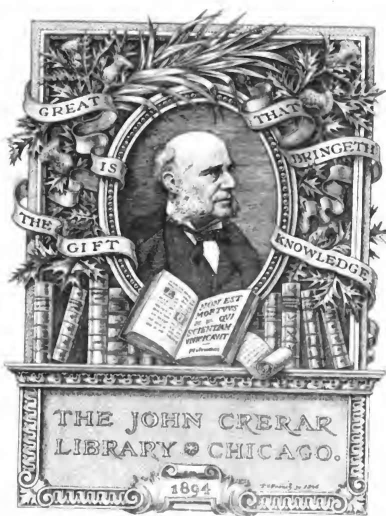
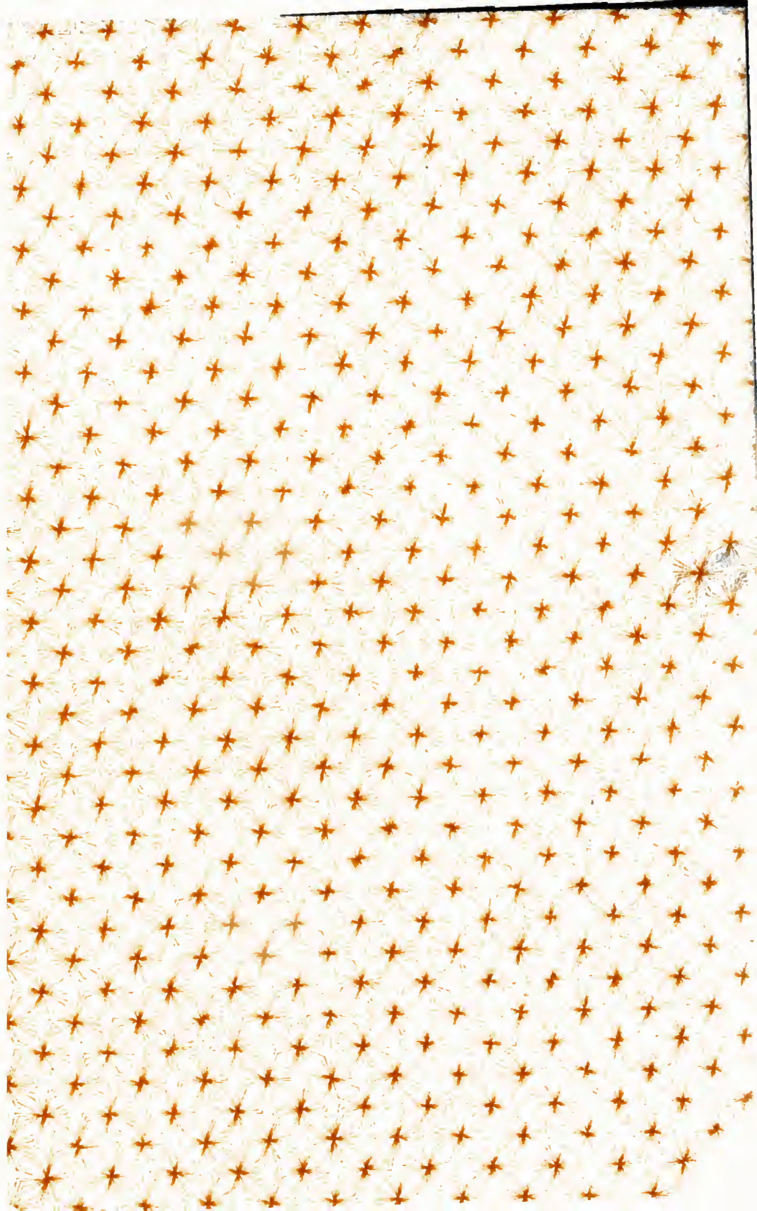

GREAT
IS
THE
GIFT
THAT
BRINGETH
KNOWLEDGE
NON EST MORTUUS QUI SCIENTIAM VIVIFICAVIT
THE JOHN CRERAR
LIBRARY CHICAGO.
1894



Repetitorien der Elektrotechnik

Herausgegeben von

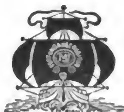
A. Königswerther
Ingenieur
Lehrer am Technikum Stadtsulza

XI. BAND

Elektrische Traktion

Von

G. Sattler
Ingenieur



HANNOVER
Dr. Max Jänecke, Verlagsbuchhandlung
1905

Repetitorien der Elektrotechnik

1. Band. Physikalische Grundlagen der Gleich- und Wechselstromtechnik.
2. Band. Elektrotechnische Messkunde, zugleich Leitfaden für das Elektrotechnische Praktikum.
3. Band. Wirkungsweise, Berechnung und Konstruktion der Gleichstromdynamomaschinen und -Motoren.
4. Band. Wirkungsweise, Berechnung und Konstruktion der Synchronmaschinen für Wechsel- und Drehstrom.
5. Band. Wirkungsweise, Berechnung und Konstruktion der Transformatoren und Asynchronmotoren.
6. Band. Theorie und Konstruktion der Akkumulatoren.
7. Band. Berechnung u. Konstruktion elektrischer Schaltapparate u. Schaltanlagen.
8. Band. Elektrische Beleuchtung.
9. Band. Stromverteilungssysteme und Berechnung elektrischer Leitungen.
10. Band. Projektieren elektrischer Anlagen.
11. Band. Elektrische Traktion.
12. Band. Grundzüge der Telegraphie und Telephonie.

Repetitorien

der Elektrotechnik

Herausgegeben von

A. Königswerther

Ingenieur

Lehrer am Technikum Stadtsulza (Th.)

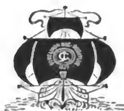
XI. Band:

Elektrische Traktion

Von

G. Sattler

Ingenieur



HANNOVER

Verlag von Gebrüder Jänecke

1905

5N

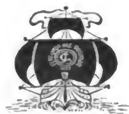
Elektrische Traktion

Von

G. Sattler

Ingenieur

Mit 123 Abbildungen



HANNOVER
Verlag von Gebrüder Jänecke
1905

5 N

Hofbuchdruckerei Gebrüder Jänecke, Hannover

Vorwort.

Um den Zweck dieses Bändchens „Elektrische Traktion" des Sammelwerkes „Repetitorien der Elektrotechnik" möglichst zu erreichen, sind rein beschreibende Abhandlungen und perspektivische Abbildungen fast ganz vermieden, und ist hauptsächlich Wert auf die Bestimmung des Kraftbedarfs elektrischer Bahnen und auf die Anfertigung von Projektzeichnungen, Gleisplänen, Kostenanschlägen usw. gelegt worden. Da der Raum, der dem gesamten Thema zur Verfügung gestellt werden konnte, klein ist, hat sich der Verfasser hauptsächlich auf Straßenbahnen beschränken müssen. Die Abschnitte I und II sind unter Mitbenutzung folgender Literatur verfaßt:

E. Arnold, „Die Gleichstrommaschine",
„Elektrotechnische Zeitschrift" (E. T. Z.),
Rasch, „Regelung der Motoren elektrischer Bahnen",
M. Müller und W. Mattersdorff, „Die Bahnmotoren für Gleichstrom",
Dr. Max Corsepius, „Grundlagen für die Berechnung und den Bau von elektrischen Bahnen".

Die sonst verwendete Literatur ist an den betreffenden Stellen angegeben.

Chemnitz, im November 1904.

Der Verfasser

Inhalts-Uebersicht.

I. Abschnitt.

Die Bewegungswiderstände elektrisch betriebener Fahrzeuge.

Der Bahnwiderstand im allgemeinen. Wenn ein durch elektrische Motoren angetriebenes Fahrzeug einen gewissen Weg zurücklegen soll, so muß dem Motor auf irgend eine Weise elektrische Energie zugeführt werden, die so groß ist, daß sämtliche der Bewegung entgegenstehenden Widerstände überwunden werden können. Während ein Teil der zugeführten Energie bereits im Motor selbst verloren geht, wird der am Umfange der Wagenräder zur Geltung kommende Teil verwendet:

Zur Ueberwindung der rollenden Reibung zwischen den Wagenrädern und den Schienen.

Zur Ueberwindung der Reibung in den Achsenlagern des Fahrzeuges.

Zur Ueberwindung des Luftwiderstandes.

Zur Ueberwindung des Bahnwiderstandes in Steigungen der Strecke.

Zur Ueberwindung des Bahnwiderstandes in Kurven der Strecke.

Zur Vermehrung der lebendigen Kraft bei der Anfahrt auf Haltestellen und in Kurven.

Die genaue Bestimmung eines jeden einzelnen dieser angeführten Widerstände bietet ganz erhebliche Schwierigkeiten, da eine exakte mathematische Behandlung der Aufgabe selbstverständlich nicht möglich ist. Vielmehr ist die Größe der einzelnen Widerstände von einer Menge Nebenumständen abhängig, die in der Beschaffenheit der Fahrbahn, der Schienen, der Wagenformen, der Witterung, der Pflege der Motoren und Fahrzeuge u. a. m. zu suchen sind.

Der Reibungswiderstand. Die Reibungs- und Luftwiderstände sind von Volkers einer eingehenden Untersuchung unterworfen worden. *(E. T. Z. 1901.)* Nach dessen Forschungen beträgt der Widerstand der rollenden Reibung und der Reibung in den Achsenlagern:

A. für Anhängewagen und nicht angetriebene Achsen des Motorwagens:

1 bis 1,3 kg/t bei eigenem Bahnkörper und asphaltierter oder gut gepflasterter Straße.

1,3 bis 2 kg/t bei Gleisen, die teils in mäßigem Pflaster, teils in Chaussierung liegen.

2 bis 2,5 kg/t bei auf Landstraßen verlegtem schmutzigen Gleis.

B. für angetriebene Achsen:

2,8 bis 3,1 kg/t bei eigenem Bahnkörper und in asphaltierter oder gut gepflasterter Straße.

3,1 bis 3,8 kg/t bei Gleisen, die teils in mäßigem Pflaster, teils in Chaussierung liegen.

3,8 bis 6,8 kg/t bei schmutzigem Gleis auf der Landstraße.

Der Luftwiderstand. Die Berechnung des Luftwiderstandes bietet insofern erhebliche Schwierigkeiten, als hier nicht allein die Vorderfläche des Motorwagens, sondern auch die Vorderflächen etwaiger Anhängewagen elektrischer Bahnen, ferner auch die Hinterperrons und Seitenflächen der Wagen in Rücksicht zu ziehen sind. Gleichzeitig spielt auch die Richtung des Windes eine wesentliche Rolle, denn es ist ohne weiteres klar, daß die Luftreibung verschiedentlich erhöht werden kann, wenn dem Fahrzeug ein mehr oder weniger starker Wind entgegen weht. Andererseits wird der Widerstand der Luft unter Umständen bedeutend verringert werden, wenn das Fahrzeug in der Richtung des Windes fährt.

Die Erfahrungen, die im Laufe der Jahre an Dampfbahnen über den Widerstand der Luft gemacht worden sind, lassen sich nicht immer ohne weiteres auf elektrisch betriebene Fahrzeuge übertragen, da hier häufig die Geschwindigkeiten wesentlich andere sind, und außerdem die Form der Wagen voneinander abweicht.

Bezeichnet F die Ausdehnung der senkrecht zur Windrichtung gestellten ruhenden Fläche in Quadratmeter und v die

Windgeschwindigkeit in m/sec, so berechnet sich nach Volkers der Luftwiderstand zu:

$$W_l = 0{,}12248\, F\, v^2.$$

Für die Größe der wirksamen Windfläche F hat Volkers für Motorwagen 7,0 m² und für Anhängewagen 2,5 m² gefunden. Mit Hülfe dieser Werte läßt sich folgende Tabelle der Winddrucke aufstellen:

Fahrgeschwindigkeit in km/St.	Winddruck in kg bei	
	Motorwagen	Anhängewagen
4	0,96	0,37
6	2,16	0,83
8	3,84	1,47
10	6,00	2,30
12	8,65	3,32
14	11,75	4,50
16	15,33	5,88
18	19,45	7,45
20	24,00	9,20
22	29,00	11,10
24	34,55	13,25
26	40,50	15,53
28	47,00	18,02
30	54,00	20,70
35	73,50	28,20
40	96,00	36,80
50	150,00	57,50

Schwierigkeiten macht die Bestimmung der tatsächlichen Geschwindigkeiten, die bei der Berechnung der Luftwiderstände in Frage kommen.

Die fahrplanmäßige Geschwindigkeit ist nicht ohne weiteres verwendbar, da, besonders bei Straßenbahnen, die Wagen in Wirklichkeit mit einer größeren Geschwindigkeit die Strecken zwischen den Haltestellen durchfahren, weil die Aufenthalte auf den Haltestellen und häufig eintretende kleine Verkehrshindernisse die fahrplanmäßige Fahrzeit erheblich herabdrücken. Nach Volkers lassen sich die Geschwindigkeiten und Anzahl der Haltestellen bei Straßenbahnen in folgenden Zusammenhang bringen. (S. umstehende Tabelle.)

Läuft z. B. auf einer Linie ein Wagen, dessen Gewicht 10 t beträgt, ist ferner die mittlere Fahrgeschwindigkeit 16 km/St. und entfallen auf einen Kilometer drei Haltestellen,

Mittlere Fahrgeschwindigkeit in km/St. zwischen den Endpunkten der Linie	Anzahl der Haltestellen pro km	Geschwindigkeit in km/St., welche für die Berechnung des Luftwiderstandes maßgebend ist
10 km/St.	3	13
10 „	4	14
10 „	5	15
10 „	6	17
12 km/St.	3	15
12 „	4	16
12 „	5	17
12 „	6	19
14 km/St.	3	18,5
14 „	4	20
14 „	5	22
14 „	6	24
16 km/St.	2	20,5
16 „	3	22
16 „	4	24
16 „	5	26
18 km/St.	2	23
18 „	3	25,5
18 „	4	28,5
20 km/St.	1	23
20 „	2	26,5
20 „	3	33

so berechnet sich der Widerstand der Reibung und der Luft folgendermaßen:

Reibungswiderstand $= 10 \cdot 3{,}8 = 38$ kg, wenn das Gleis mäßig sauber ist und zum Teil in chaussierter, zum Teil in gepflasterter Straße liegt.

Bei drei Haltestellen ist der Luftwiderstand nach vorhergehender Tabelle für eine Geschwindigkeit von 22 km/St. zu berechnen.

Er beträgt somit:

$$P = 0{,}12248 \cdot 7 \cdot 22^2 = 29{,}00 \text{ kg.}$$

Der Gesamtwiderstand für Reibung und Luftdruck ist demnach:

$$38 + 29 = 67{,}00 \text{ kg.}$$

Die von Volkers angegebene Formel zur Berechnung des Winddruckes (Seite 3) liefert für Fahrgeschwindigkeiten bis etwa 50 km/St. brauchbare Resultate. Es ist anzunehmen, daß bei Geschwindigkeiten über 50 km/St. der Luftwiderstand nicht mehr mit dem Quadrate der Geschwindigkeit, sondern langsamer wächst.

Der Widerstand in Bahnkrümmungen. In jeder Kurve einer Schienenbahn tritt ein mehr oder weniger hoher Widerstand entgegen der Bewegung der Fahrzeuge auf. Der Widerstand entsteht dadurch, daß infolge der verschiedenen Krümmungsradien der beiden Schienenstränge die Räder beim Passieren der Kurve gleiten müssen. Bei nachlässiger Verlegung der Gleise kann auch und besonders bei Straßenbahnen der Fall eintreten, daß sich die Räder in den Gleisen klemmen und dadurch eine Erhöhung des Widerstandes eintritt.

Diese Widerstände sind selbstverständlich abhängig von dem Radius der Krümmung, der Spurweite und dem Radstande. Da es sich auch bei kleineren elektrischen Bahnanlagen stets zweckmäßig erweist, in Kurven die äußere Schiene gegen die innere zu überhöhen, wird der Spurkranz der äußeren Laufräder infolge der Zentrifugalkraft stark gegen die Schiene gedrückt, wodurch neben bedeutender Abnutzung des Materials auch ein erheblicher Reibungswiderstand auftreten muß. Bei Anwendung von Rillenschienen werden sich die genannten Widerstände wegen der eigentümlichen Schienenform noch erhöhen.

Es ist verschiedentlich versucht worden, die in Bahnkrümmungen auftretenden Widerstände möglichst durch präzise, allgemeine Formeln auszudrücken, welche jedoch naturgemäß mitunter ganz bedeutende Abweichungen in den Resultaten zeigen. Für Bahnen mit größeren Krümmungsradien (Vollbahnen) gibt *Blondel u. Dubois* in *„la traction électrique“* die Formel

$$W_c = \frac{370}{R - 10} \text{ kg/t},$$

worin W_c den Widerstand der Bahnkrümmung in kg/t, R den Radius der Kurve in m bedeutet.

Wird mit s die Spurweite des Gleises in m bezeichnet, so kann der Zusatzwiderstand auch empirisch ausgedrückt werden durch

$$W_c = 300 \text{ bis } 400 \cdot \frac{s}{R} \text{ kg/t}.$$

Da im allgemeinen jedoch die Längen der Kurvenbögen bei kleinem Radius nicht bedeutend sein werden, erübrigt es sich, den in den Kurven auftretenden Widerstand durch besondere Werte in Rechnung zu setzen. Vielmehr genügt es, ihn durch eine verhältnismäßige Erhöhung des gesamten Kraftbedarfs zu berücksichtigen.

Der Traktionskoeffizient. Da, wie aus dem Gesagten hervorgeht, eine genaue Ermittlung der einzelnen Bahnwiderstände auf Schwierigkeiten und Ungenauigkeiten stößt, andererseits sich aber im Laufe der Jahre gewisse Konstruktionsnormen für die Motoren, Wagen, Schienen usw., ferner auch ziemlich begrenzte Geschwindigkeiten für elektrisch betriebene Fahrzeuge herausgebildet haben, wird im allgemeinen in der Praxis von einer Berücksichtigung der einzelnen Bahnwiderstände Abstand genommen. Man rechnet mit einem Widerstandskoeffizienten, der je nach der Beschaffenheit der Schienen oder der Fahrbahn einen bestimmten Wert besitzt. Dieser Widerstandskoeffizent wird allgemein als Traktionskoeffizient bezeichnet und gewöhnlich auf 1 t fortzubewegender Last bezogen. Er ist somit unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit. Der Traktionskoeffizient gibt also an, wieviel Kilogramm Zugkraft nötig sind, um eine Tonne des Wagengewichts auf horizontaler Bahn vorwärts zu bewegen.

Nach mannigfachen Versuchen und auf Grund langjähriger Erfahrungen sind folgende Zugkräfte nötig, um eine Tonne Last auf Rädern fortzubewegen:

auf	Eisenbahngleisen (Vignolschienen) ...	4— 8	kg,
„	Straßenbahngleisen (Rillenschienen)..	12—15	„
„	gutem Steinpflaster	20—25	„
„	schlechtem Steinpflaster	30—35	„
„	chaussierten Straßen..	20—30	„
„	schlecht chaussierten Straßen	35—45	„
„	Sandwegen	60—100	„

Die Zugkraft auf horizontaler Bahn. Bedeutet

P das Gewicht eines Motorwagens einschließlich der Motoren und der Besetzung in t,

Q das Gewicht etwaiger Anhängewagen mit voller Besetzung in t,

f den Traktionskoeffizienten für horizontale Strecke in kg/t,

Z die Zugkraft, die zur Fortbewegung der Wagen auf horizontaler Bahn nötig ist, in kg,

so läßt sich die Zugkraft ausdrücken durch

$$Z = (P + Q) \cdot f \text{ kg.}$$

Der Widerstand und die Zugkraft auf Steigungen. Sind von einem elektrischen Fahrzeuge Steigungen zu überwinden,

so wird der Bahnwiderstand erhöht, da Arbeit zur Ueberwindung der Schwerkraft verbraucht werden muß.

Die Schwerkraft G des Wagens (Abb. 1), die im Schwerpunkt S des Wagens angreifend zu denken ist, zerlegt sich in die beiden Komponenten $G \cdot \cos \alpha$ und $G \cdot \sin \alpha$, wenn unter α der Neigungswinkel der Strecke gegen die Horizontale verstanden wird. Die Kraft $G \cdot \sin \alpha$ wirkt selbstverständlich parallel, die Kraft $G \cdot \cos \alpha$ senkrecht zur Fahrbahn.

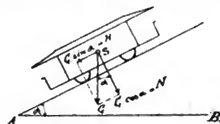


Abb. 1.

Durch die Vertikalkomponente $N = G \cos \alpha$ wird der Druck des Wagens auf die Schienen bzw. die Fahrbahn dargestellt. Die Horizontalkomponente $H = G \sin \alpha$ sucht den Wagen nach abwärts zu ziehen, bildet also dadurch eine Erhöhung des Bahnwiderstandes.

Beträgt das gesamte zu befördernde Gewicht wieder $P + Q$ kg, so ist die auf der Steigung erforderliche Zugkraft gegeben durch

$$Z = (P + Q) \cdot f + 1000 \cdot (P + Q) \cdot \sin \alpha \text{ kg.}$$

Die trigonometrische Funktion $\sin \alpha$ läßt sich darstellen durch

$$\sin \alpha = \frac{1}{n},$$

wenn n den Weg des Motorwagens in m bezeichnet, auf dem der Wagen um 1 m gehoben wird (Abb. 1).

Es wird somit

$$Z = (P + Q) \cdot (f + \frac{1000}{n}) \text{ kg.}$$

Es ist allgemein üblich, die Steigung s in $^0/_{00}$ anzugeben. Es ergibt sich somit

$$\sin \alpha = \frac{s}{1000}$$

und
$$Z = (P + Q) \cdot (f + s) \text{ kg.}$$

Der Energieverbrauch eines Motors. Bedeutet v die Geschwindigkeit des Wagens in m/sec, A die Gesamtleistung des Motorwagens am Radumfange in PS., so ist

$$A = Z \cdot v = \frac{(P + Q) \cdot (f + s) \cdot v}{75} \text{ PS.}$$

Meistens ist die Geschwindigkeit nicht in m/sec, sondern in km/St $= V$ gegeben; es ändert sich vorstehende Formel dadurch um in

$$A = \frac{(P + Q) \cdot (f + s) \cdot V}{75 \cdot 3,6} \text{ PS.}$$

Soll die von dem Motor abgegebene Gesamtleistung in Watt ausgedrückt werden, so ist zu beachten, daß

1 mkg = 9,81 Watt,

somit wird

$$A = (P + Q) \cdot (f + s) \cdot v \cdot 9,81 \text{ Watt.}$$

Die Energiemenge, die dem Motorwagen zugeführt werden muß, ist selbstverständlich größer als die abgegebene. Bezeichnet man mit η den Wirkungsgrad der Motoren im Wagen, so wird die Leistung, welche die elektrischen Motoren der Leitung entnehmen, ausgedrückt durch

$$L = \frac{(P + Q) \cdot (f + s) \cdot V}{75 \cdot 3,6 \cdot \eta} \text{ PS}$$

oder

$$L = \frac{(P + Q) \cdot (f + s) \cdot V}{75 \cdot 3,6 \cdot \eta} \cdot 736 \text{ Watt.}$$

Während bei einer Bergfahrt des Motorwagens, wie oben näher erörtert, die Kraftkomponente $H = (P + Q) \cdot \sin \alpha$ von einer zusätzlichen Zugkraft überwunden werden muß, wird diese Kraft bei der Talfahrt des Fahrzeuges die Bewegung des Wagens unterstützen. Infolgedessen lautet die Gleichung für die Leistung der Wagenmotoren ganz allgemein

$$L = \frac{(P + Q) \cdot (f \pm s) \cdot V}{75 \cdot 3,6 \cdot \eta} \cdot 736 \text{ Watt.}$$

Das positive Zeichen von s ist gültig für Bergfahrt, das negative für Talfahrt. Erreicht $-s$ gerade den Wert von f, so wird der Klammerausdruck und damit die Leistung L gleich Null, d. h. der Wagen bewegt sich gleichmäßig schnell ohne Energieaufnahme vorwärts. Wird $-s$ dagegen größer als f, so bedeutet dies, daß der Wagen sich mit einer gewissen Beschleunigung das Gefälle hinabbewegt, so daß der Wagen selbst Arbeit leisten kann, die unter Umständen abzubremsen ist.

Stromstärke und Geschwindigkeit auf verschiedenen Steigungen. Zur schnellen Bestimmung der Stromstärken und Geschwindigkeiten elektrischer Bahnwagen kleinerer Dimension

auf verschiedenen Steigungen kann man sich zweckmäßig eines graphischen Verfahrens nach Fischer-Hinnen *(E. T. Z. 1894, Heft 29)* bedienen.

Beträgt das Gewicht des Wagens mit voller Ausrüstung und Besetzung $Q = 8$ t,

die maximal zu überwindende Steigung $s = 50\,^0/_{00}$,
die Größe des Traktionskoeffizienten $f = 12$ kg/t,
die mittlere Klemmenspannung $= 500$ Volt,
der mittlere Wirkungsgrad $\eta = 60\,^0/_0$,
die durchschnittliche Geschwindigkeit $V = 12$ km/St,

so berechnet sich die gesamte vom Motor aufzunehmende Stromstärke zu

$$J = \frac{Q \cdot (f+s) \cdot V \cdot 736}{75 \cdot 3{,}6 \cdot \eta \cdot 500} = \frac{8 \cdot (f+s) \cdot 12 \cdot 736}{75 \cdot 3{,}6 \cdot 0{,}6 \cdot 500}$$
$$= 0{,}87\ (f+s) \text{ Amp.}$$

Nimmt man an, daß der Wirkungsgrad und die Geschwindigkeit auf allen Steigungen konstant bleibt, so erhält man für die verschiedenen Steigungen verschiedene Stromstärken wie folgt:

$s = 0\,^0/_{00}$	$J = 1{,}31$	Ampère	für	1 Tonne	Wagengewicht
$s = 10\,^0/_{00}$	$J = 2{,}39$	„	„	„	„
$s = 20\,^0/_{00}$	$J = 3{,}48$	„	„	„	„
$s = 30\,^0/_{00}$	$J = 4{,}57$	„	„	„	„
$s = 40\,^0/_{00}$	$J = 5{,}66$	„	„	„	„
$s = 50\,^0/_{00}$	$J = 6{,}74$	„	„	„	„

Die zusätzliche Stromstärke auf einer Steigung von $20\,^0/_{00}$ beträgt somit 3,48 Ampère für 1 t Wagenwicht. Für das Wagengewicht von 8 t erhält man somit für

$s = 0\,^0/_{00}$	$J = 10{,}5$	Ampère
$s = 10\,^0/_{00}$	$J = 19{,}1$	„
$s = 20\,^0/_{00}$	$J = 27{,}8$	„
$s = 30\,^0/_{00}$	$J = 36{,}6$	„
$s = 40\,^0/_{00}$	$J = 45{,}66$	„
$s = 50\,^0/_{00}$	$J = 53{,}60$	„

Um nun aus vorstehenden Werten für J und V die wirklichen auf einer Steigung auftretenden Größen der Stromstärke und Geschwindigkeit zu bestimmen, legt man in der Darstellung der Geschwindigkeitskurve des Motors (Abb. 2) durch die beiden Koordinaten

$y = 12$ km/St und
$x = 10{,}5$ Amp. (bzw. 19,1, 27,8, 36,6 usw. Amp.)

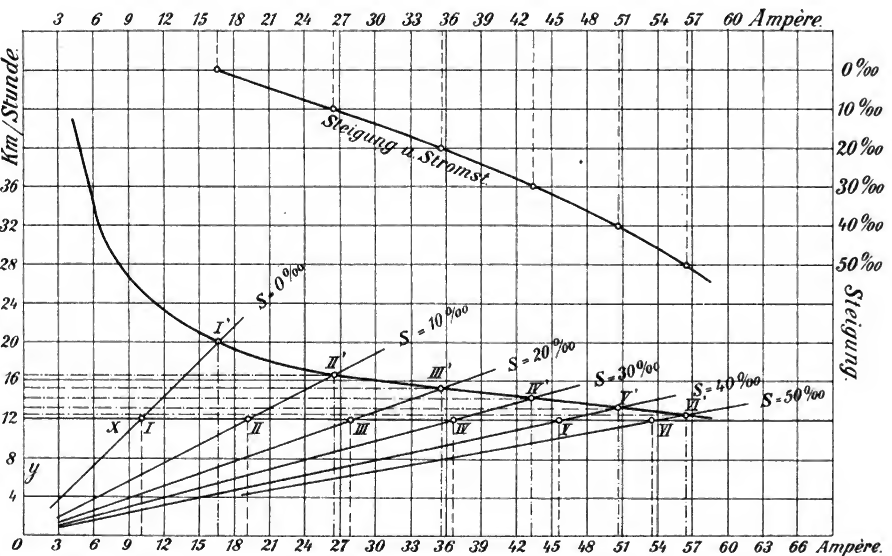

3 6 9 12 15 18 21 24 27 30 33 36 39 42 45 48 51 54 57 60 Ampère.
Km/Stunde.
36
32
28
24
20
16
12
8
4
0
y
0 ‰
10 ‰
20 ‰
30 ‰
40 ‰
50 ‰
Steigung.
Steigung u. Stromst.
S = 0 ‰
S = 10 ‰
S = 20 ‰
S = 30 ‰
S = 40 ‰
S = 50 ‰
I'
II'
III'
IV'
V'
VI'
X
I
II
III
IV
V
VI
3 6 9 12 15 18 21 24 27 30 33 36 39 42 45 48 51 54 57 60 63 66 Ampère.

Abb. 2.

eine Anzahl Punkte I, II, III, IV usw. fest, die mit dem Koordinatenanfang geradlinig verbunden werden. Die Verlängerungen dieser Geraden über die Punkte I, II, III usw. hinaus schneiden sich mit der Geschwindigkeitskurve in den Punkten I′, II′, III′, IV′ usw. Diese Punkte können als brauchbare Annäherungswerte der wirklichen Stromstärke und Geschwindigkeit bei der entsprechenden Steigung gelten.

In Abb. 2 ist gleichzeitig an Hand des soeben erläuterten Verfahrens, zur Darstellung der für bestimmte Steigungen erforderlichen Stromstärken, die Steigung in Abhängigkeit von der Stromstärke gebracht, so daß sich auch die Stromstärken für Steigungen zwischen den Werten 0,10, 20, 30, 40 und 50 liegend, direkt der Kurve entnehmen lassen.

Der Wattverbrauch eines Motorwagens. Der Aufwand an Wattstunden pro Wagenkilometer läßt sich bestimmen mit Hülfe der Formel

$$L = \frac{(P + Q) \cdot (f + s) \cdot V \cdot 736}{75 \cdot \eta \cdot 3{,}6} \text{ Watt.}$$

Hierin bezeichnet V den Weg in km, der in einer Stunde vom Fahrzeug zurückgelegt wird. Es macht sich deswegen beim Durchfahren von 1 km Weg ein Aufwand von

$$\frac{(P + Q) \cdot (f + s) \cdot V \cdot 736}{75 \cdot \eta \cdot 3{,}6 \cdot V} = \frac{(P + Q) \cdot (f + s) \cdot 736}{75 \cdot \eta \cdot 3{,}6}$$

Wattstunden erforderlich.

Man erhält somit den Wattstundenverbrauch für das Tonnenkilometer zu

$$W_t = \frac{(f + s) \cdot 9{,}81}{3{,}6 \cdot \eta}.$$

Läuft der Wagen auf einem Gefälle, so beträgt der Wattstundenverbrauch für das Tonnenkilometer selbstverständlich

$$W_t = \frac{(f - s) \cdot 9{,}81}{3{,}6 \cdot \eta}.$$

Der Widerstand der Beschleunigung. Bei Bahnen, welche infolge lokaler Straßenverhältnisse entweder gar nicht oder nur sehr wenig mit Schienenüberhöhungen in Krümmungen verlegt werden können (Straßenbahnen), tragen die Kurven insofern wesentlich zur Erhöhung des gesamten Kraftbedarfs bei, als in solche gar nicht oder nur wenig überhöhte Kurven der

Wagen mit nur mäßiger Geschwindigkeit einfahren darf, um heftige Stöße oder gar ein Entgleisen des Wagens zu vermeiden. Hat der Wagen den Anfang der Kurve passiert, so muß von neuem in der Kurve der Wagen beschleunigt werden. In diesem häufigen Wiederanfahren ist der Grund der Erhöhung des Energiebedarfs einer kurvenreichen Straßenbahn hauptsächlich zu suchen. Es folgt somit aus dem vorstehenden, daß jede Bahnkrümmung nicht nur mit Schienenüberhöhung zu verlegen ist, sondern daß auch zweckmäßig zwischen Bogen und gerade Strecke eine Uebergangskurve eingeschaltet wird, wodurch die Kurven mit größerer Geschwindigkeit durchfahren werden können.

Die Verminderung der Fahrgeschwindigkeit und neue Anfahrt ist ferner bei jeder Haltestelle der Strecke nötig, wobei ebenfalls ein bedeutender Energieverbrauch aufzuwenden ist. Dieser Verbrauch an Arbeit ist um so erheblicher, je größer die Beschleunigung ist, mit der man anfährt und je größer die Steigung ist, auf der der Wagen sich in Bewegung setzen soll. Es ist deshalb stets darauf zu achten, daß die Haltestellen möglichst auf horizontale Teile der Strecken zu liegen kommen.

Auch die Bedienung des Motors durch den Wagenführer bei der Anfahrt und Bremsung ist von Einfluß auf den Energieverlust. Schaltet der Wagenführer bei der Anfahrt die Vorschaltwiderstände innerhalb zu langer Zeiträume von den Motoren ab, so wird in den Widerständen unnötige Arbeit verbraucht. Andererseits kann an Strom gespart werden, wenn die Stromzufuhr bei der Annäherung an eine Haltestelle so zeitig unterbrochen wird, daß die lebendige Kraft des Wagens, die derselbe während der Beschleunigungsperiode erhalten hat, möglichst vollkommen ausgenutzt wird und nur kurz vor der Haltestelle der Wagen abzubremsen ist.

Eine eingehende Betrachtung über die Vorgänge während der Beschleunigungsperiode wird weiter unten durchgeführt werden. Will man jedoch, ähnlich wie es mit dem gesamten übrigen Bahnwiderständen geschehen ist, diesen Mehrverbrauch an Energie einfach durch einen gewissen prozentualen Zuschlag in Rücksicht ziehen, so kann nach Schröder *(E. T. Z. 1899)* für das Anfahren pro Wagen ein Zuschlag von 25 Proz. des Traktionskoeffizienten gemacht werden.

Die Leistung der Motoren eines einzelnen Wagens wird somit:

$$L = \frac{(P + Q) \cdot (1,25\, f + s) \cdot V}{75 \cdot \eta \cdot 3,6} \cdot 736 \text{ Watt.}$$

Allerdings ist zu bemerken, daß der Zuschlag von 25 Proz. des Traktionskoeffizienten für das Anfahren sich nur auf einen mittleren Verlust bezieht, der durch die Beschleunigung des Wagens entstehen kann. Bei Anlagen kleinerer Ausdehnung würde derselbe durchaus nicht zu richtigen Resultaten führen, da es hier vorkommen kann, daß zu gleicher Zeit zufällig alle oder wenigstens der größte Teil der Wagen anfahren. Es muß infolgedessen je nach der Anzahl der Wagen und nach den jeweiligen Steigungsverhältnissen ein niedrigerer oder höherer Zuschlag zum Gesamtkraftbedarf gemacht werden. Bei Anlagen größerer Ausdehnung wird im allgemeinen der Zuschlag von 25 Proz. ausreichen.

Bedeutet somit

K den gesamten maximalen Kraftbedarf einer Bahn in PS,

p den Zuschlag für Anfahren bei kleineren Anlagen in Prozenten der Gesamtleistung,

η' das Güteverhältnis der Dynamo in der Zentrale,

so beträgt die an den Klemmen der Dynamo abzugebende elektrische Energie

$$L = \frac{K \cdot p}{\eta'} \cdot 736 \text{ Watt.}$$

Je nach der Zahl der Wagen wird p 10 bis 20 % von K betragen.

Die Adhäsion. Soll eine Lokomotive einen schweren Zug in Bewegung setzen, so kann man häufig und besonders bei nassem, schmutzigem Gleise die Beobachtung machen, daß der Zug sich nicht in Bewegung setzt, sondern die Räder beginnen sich auf der Stelle zu drehen, d. h. zu „schleudern“. Die Ursache dieser Erscheinung ist darin zu suchen, daß bei verringertem Reibungswiderstand zwischen Schiene und Rädern der Widerstand zwischen Rad und Schiene zu klein wird. Diesen Widerstand, der in Kilogramm ausgedrückt wird und vom Gewichte der Lokomotive abhängig ist, bezeichnet man als Adhäsion.

Der Reibungswiderstand von Eisen auf Eisen kann je nach der Beschaffenheit des Gleises sehr verschiedene Werte annehmen. Während er bei vollkommen trockenem Gleis einen Wert von etwa 0,24 erreichen kann, der bei Anwendung guter Sandstreuapparate noch höher steigt, beträgt er bei feuchtem Gleise 0,12 und weniger. Die Adhäsion spielt besonders bei

stärkeren Steigungen und bei Verwendung von Anhängewagen eine wichtige Rolle, da der Fall denkbar ist, daß wohl die Zugkraft des Antriebsmotors zur Fortbewegung des gesamten Zuges ausreicht, dagegen das Gewicht der Lokomotive zu klein ist, so daß die Adhäsion derselben nicht genügt, die Anhängewagen vorwärts zu ziehen.

Selbstverständlich kann bei Bestimmung des Adhäsionsgewichts nur der Teil des Lokomotivgewichts in Rechnung gezogen werden, der tatsächlich auf die angetriebenen Achsen der Lokomotive entfällt. Hierin besitzt der elektrische Antrieb dem Dampfbetriebe gegenüber einen nennenswerten Vorteil, da in den meisten Fällen bei einem elektrisch betriebenen Fahrzeuge der Antrieb auf mehrere Achsen verteilt ist, ohne daß irgendwelche Räderkupplungen in Anwendung gebracht sind.

Soll das Adhäsionsgewicht bei Berechnung der Zugkraft oder Leistung der Motoren elektrisch betriebener Fahrzeuge berücksichtigt werden, so kann dies auf folgende Weise geschehen.

Es bedeute

G_a das erforderliche Adhäsionsgewicht der Lokomotive in t,
P das Gewicht des ganzen Zuges in t (ausschließlich Adhäsionsgewicht),
ρ den Adhäsionskoeffizienten $= 0{,}12$,
f den Traktionskoeffizienten in kg/t,
s die Steigung der Strecke in $^0/_{00}$.

Dann kann man setzen

$$1000 \cdot G_a \cdot \rho \geqq (P + G_a) \cdot (f + s),$$

indem man beachtet, daß die Adhäsion größer oder wenigstens gleich dem Werte der Zugkraft sein muß. Hieraus folgt:

$$G_a = \frac{P \cdot (f + s)}{1000 \cdot \rho - (f + s)} \text{ t.}$$

Die zu entwickelnde Zugkraft Z in kg ergibt sich zu

$$Z = (P + G_a) \cdot (f + s) = 1000 \cdot G_a \cdot \rho = \frac{P \cdot (f + s)}{1 - \frac{f + s}{1000 \cdot \rho}} \text{ kg.}$$

Fährt ein Motorwagen ohne Anhängewagen, und wird jede Achse des Motorwagens angetrieben, so ist das Adhäsionsgewicht gleich dem Gesamtgewicht des Wagens. Die maximale

durch Adhäsion noch befahrbare Steigung berechnet sich sodann aus

$$1000 \cdot G_a \cdot \rho = G_a \cdot (f + s)$$

zu

$$s = 1000\,\rho - f.$$

Beträgt z. B. $\rho = 0{,}12$ und $f = 10$, so ist

$$s = 1000 \cdot 0{,}12 - 10 = 110\,^0/_{00}.$$

Stärkere Steigungen von kurzer Dauer lassen sich mit Adhäsion leichter dann befahren, wenn vor der Steigung dem Wagen eine gewisse Geschwindigkeit erteilt werden kann, so daß die im Wagen aufgespeicherte lebendige Energie die Zugkraft der Motoren bei Befahrung der Steigung unterstützt.

II. Abschnitt.

Die Motoren elektrisch betriebener Fahrzeuge.

Die Motoren im allgemeinen. Als Motoren, die elektrisch betriebene Fahrzeuge jeder Art in Bewegung setzen, können Gleichstrommotoren als Haupt- oder Nebenschlußmotoren und auch Wechselstrommotoren verschiedener Phasenzahl in Frage kommen. Allerdings eignet sich durchaus nicht jede Motorart gleichgut für einen bestimmten Fall elektrischer Traktion, vielmehr kommt es bei der Wahl der Motortype wesentlich auf die Eigenarten der elektrischen Traktionsanlage an. So ist bekanntlich bei elektrischen Straßenbahnen der Betrieb außerordentlichen Schwankungen unterworfen. Durch die wechselnde Besetzung des Wagens, durch die Steigungen der Strecken und besonders durch die häufigen Haltestellen wird die Stromentnahme niemals eine gleichmäßige sein können, sondern innerhalb verhältnismäßig kurzer Zeiträume bedeutend variieren. Da bei der Anfahrt eines Bahnwagens die vom Motor zu liefernde Zugkraft häufig das drei- bis vierfache der normalen Zugkraft sein muß,

so folgt, daß ein für einen Straßenbahnwagen bestimmter Motor imstande sein muß, für eine kurze Zeit eine wesentlich größere Zugkraft zu entwickeln, als der normalen Leistung des Motors entspricht.

Diesen Bedingungen genügt bekanntlich am besten der Gleichstromhauptstrommotor, so daß zurzeit dieser bei elektrisch betriebenen Straßenbahnen und Transportbahnen jeder Art fast ausschließlich zur Verwendung kommt. Der Motor reguliert seine Geschwindigkeit nach der Belastung, so daß er unter Belastung langsam anläuft und gleichzeitig eine der Belastung entsprechend hohe Zugkraft entwickelt. Der Hauptstrommotor besitzt somit eine größere Ueberlastungsfähigkeit als der Nebenschlußmotor. Allerdings besitzt er dem letztern gegenüber den Nachteil, daß er keinen Strom in das Netz zurückzuliefern vermag.

Von den Wechselstrommotoren kommen vorläufig ernstlich nur die Drehstrommotoren in Betracht. Zum Betriebe von Bahnen eignet sich dieser Motor nur dann, wenn er mit normaler Belastung und Tourenzahl laufen kann. In diesen Beziehungen ähnelt er dem Gleichstromnebenschlußmotor. Der Drehstrommotor läßt sich somit für elektrische Bahnen mit hohen Geschwindigkeiten, wenig Haltestellen und eigenem Bahnkörper vorzüglich in Anwendung bringen. Ein eigener Bahnkörper macht sich bei Bahnanlagen mittels Drehstrombetriebes deswegen zur fast unerläßlichen Bedingung, weil mindestens zwei Oberleitungsdrähte vorhanden sein müssen und diese nach neuesten Erfahrungen zweckmäßig übereinander angeordnet werden. Der Drehstrommotor hat sich auf verschiedenen Vollbahnen und bei Schnellbahnbetrieb vollkommen bewährt.

In den meisten Fällen wird die Versorgnng langer Bahnlinien rationeller mit Drehstrom als mit Gleichstrom erfolgen, da der hochgespannte Strom nach Umformung oder auch direkt den Wagenmotoren zugeführt werden kann.

A. Gleichstrommotoren.

α) Der Hauptstrommotor.

Das Anfahren. Unter der Anfahrt eines Fahrzeuges sind alle die Vorgänge zu verstehen, die bis zur Erreichung der vollen Fahrgeschwindigkeit auftreten. Eine wesentliche Beachtung bei der Anfahrt eines Wagens verdient die Stromstärke, die in dieser Fahrperiode erheblich über die normale steigt.

Für ein ruhiges und stoßfreies Angehen ist es erforderlich, die Beschleunigung während der Anfahrt möglichst konstant zu halten. Dies bedingt, daß die Zugkraft bzw. Stromstärke möglichst auf gleicher Höhe gehalten wird.

Bezeichnet
t die Zeit der Anfahrt in sec,
v die Endgeschwindigkeit, die der Wagen erreichen soll, in m/sec,
Z die gesamte Zugkraft in kg,
Z' die beschleunigende Zugkraft in kg,
Z_0 die für Ueberwindung der Bahnwiderstände nötige Zugkraft,
p die Beschleunigung in m/sec^2,
so ergibt sich:

beschleunigende Kraft = beschleunigende Masse $\times$ Beschleunigung,

d. h.:
$$Z' = M \cdot p = \frac{G}{g} \cdot p,$$
wenn
M die zu beschleunigende Masse,
G das Gewicht dieser Masse,
g die Erdbeschleunigung bedeuten.

Bezeichnet man weiterhin mit v_0 die Anfangsgeschwindigkeit des Wagens, so ist:
$$v = v_0 + p \cdot t.$$
Da nun:
$$v_0 = 0,$$
so ist:
$$p = \frac{v}{t},$$
somit erhält man:
$$Z' = \frac{G}{g} \cdot \frac{v}{t}$$
oder:
$$Z' \cdot t = \frac{G}{g} \cdot v = (Z - Z_0) \cdot t.$$
Hieraus ergibt sich:
$$Z = \frac{G}{g} \cdot \frac{v}{t} + Z_0 \text{ kg}.$$
Ist z. B. $G = 7\,t$, $v = 4$ m/sec, $t = 50$ sec, $f = 12$ kg/t, $s = 0{,}00\,^0/_{00}$, so wird:
$$Z = \frac{7 \cdot 1000 \cdot 4}{9{,}81 \cdot 50} + 12 \cdot 7 = 140 \text{ kg}.$$

Zur Bestimmung der für diese Zugkraft nötigen Stromstärke und Leistung des Motors bedient man sich des gebräuchlichen Motordiagrammes, in welchem die Kurven der Zugkraft, der Geschwindigkeit, des Wirkungsgrades und der Stromstärke in Abhängigkeit von der Leistung dargestellt sind. Ein solches Diagramm zeigt Abb. 3. Hiernach würde also für eine Zugkraft von 140 kg eine Stromstärke von etwa 20 Ampère erforderlich sein.

Häufig bringt man auch in dem Motordiagramm die Zugkraft, die Geschwindigkeit, den Wirkungsgrad und die Leistung in Abhängigkeit von der Stromstärke, wie das später geschehen ist.

Im allgemeinen kann man sagen, daß die Anlaufstromstärke so groß als möglich gewählt werden soll. Es werden dadurch geringe Verluste durch Stromwärme im Anker und eine kurze Anfahrtszeit erreicht. Die Beschleunigung darf bei Bahnen mit Rücksicht auf die Fahrgäste allerdings nicht so hoch gewählt werden, daß das Anfahren des Wagens unter heftigen Stößen erfolgt. Auch darf die Anfahrtsstromstärke nicht so hoch sein, daß die Räder des Wagens „schleudern", d. h. sich auf den Schienen an Ort und Stelle drehen, ohne den Wagen vorwärts zu bewegen. Dieses Schleudern tritt bekanntlich dann ein, wenn die der Anfahrtsstromstärke entsprechende Zugkraft größer ist als die Adhäsion des Wagens. Selbstverständlich hängt außerdem die Anfahrtsstromstärke auch von der Konstruktion und Größe des zur Verwendung kommenden Motors ab.

Im allgemeinen beträgt die höchste zulässige Stromstärke bei Bahnmotoren etwa 150—180 % derjenigen Stromstärke, die bei Dauerleistung des Motors in Frage kommen würde.

Die Anlaufstromstärke des Motors, dessen Diagramm in Abb. 3 abgebildet ist, würde somit zu etwa 20 Ampère anzunehmen sein, ein Wert, der dem oben berechneten entspricht.

Die Regulierung der Geschwindigkeit. Die Regulierung der Geschwindigkeit bei Hauptstrommotoren kann auf verschiedene Weise vor sich gehen:

1) durch Einwirkung von Vorschaltwiderständen auf den Motorstromkreis (hierher gehört auch die Sprague-Schaltung),
2) durch Hintereinander- und Parallelschaltung zweier oder mehrerer Motoren unter Mitbenutzung von Vorschaltwiderständen (Serien-Parallelschaltung),

3) durch Aenderung des Magnetfeldes durch Parallelschaltung eines veränderlichen Widerstandes zu den Magnetwicklungen (Shunt-Methode),
4) durch Aenderung der Spannung an der Elektrizitätsquelle selbst.

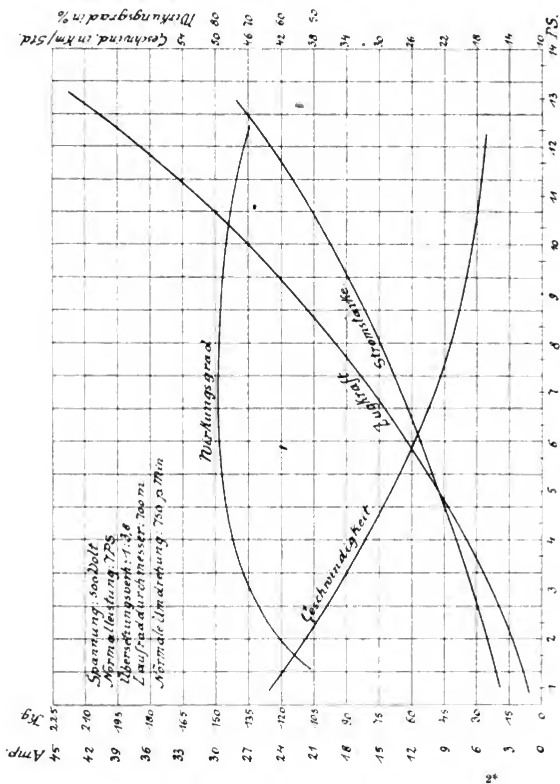


Abb. 3.

1. Vorschaltwiderstände. Diese Methode der Geschwindigkeitsregulierung ist eine äußerst verbreitete, da dieselbe sowohl vollständig gesondert für sich als auch in Verbindung mit anderen später zu besprechenden Reguliermethoden Anwendung findet. Die Verwendung der Geschwindigkeitsregulierung durch reine Vorschaltwiderstände empfiehlt sich besonders dort, wo diese Widerstände nicht dauernd, sondern z. B. nur während der Periode des Anfahrens in den Stromkreis des Motors eingeschaltet sind. Es werden hierbei im allgemeinen bei richtiger Bedienung der Schaltapparate die Energieverluste, die in den Widerständen selbstverständlich auftreten, unbedeutend sein. Ein weiterer Vorteil dieser Methode liegt in der Einfachheit des Steuerapparates (Kontrollers).

Bedeutet

D das Drehungsmoment,
$\mathfrak{v}$ die Winkelgeschwindigkeit,
E die elektromotorische Kraft,
J die Stromstärke eines Hauptstrommotors,

so gilt die Beziehung

$$D \cdot \mathfrak{v} = E \cdot J.$$

Stellt man D als Funktion der Stromstärke J dar, so erhält man

$$D = \frac{E}{\mathfrak{v}} \cdot J = f(J) \cdot J.$$

Diese Kurve des Drehungsmoments in Abhängigkeit von der Stromstärke dient zur Charakterisierung eines Motors und wird bekanntlich als mechanische Charakteristik bezeichnet.

Beachtet man ferner, daß sich die elektromotorische Kraft darstellen läßt durch die Beziehung

$$E = K - J \cdot W,$$

worin K die Klemmenspannung und W den Widerstand der Maschine bedeutet, so kann man schreiben:

$$\mathfrak{v} = \frac{E \cdot J}{D} = \frac{J \cdot (K - J \cdot W)}{D}.$$

Da nun $D = f(J) \cdot J$ ist, so erhält man

$$\mathfrak{v} = \frac{J(K - J \cdot W)}{D} = \frac{J \cdot (K - J \cdot W)}{f(J) \cdot J} = \frac{K - J \cdot W}{f(J)} = \frac{K \cdot f(J) - D \cdot W}{[f(J)]^2}.$$

Durch diese Formel wird die maximale Geschwindigkeit des Mortors dargestellt. Soll dieselbe vermindert werden, so

hat man einen Widerstand W_x dem Stromkreise hinzuzufügen und erhält dadurch eine Geschwindigkeit von

$$\mathfrak{v}' = \frac{K \cdot f(J) - D\,(W + W_x)}{[f(J)]^2}.$$

Außer auf analytische Weise lassen sich die Regulierwiderstände eines Motors auch graphisch nach einem zuerst von Bragstad angegebenen und mehrfach verwendeten Verfahren wie folgt bestimmen.

Zuerst hat man die Anlaufstromstärke festzulegen. Dies geschieht nach dem oben angegebenen Verfahren, indem der Wert der normalen Stromstärke bei Dauerbetrieb um 60 bis 80 % erhöht wird. Wählen wir den Motor, dessen Betriebskurven in Abb. 3 gegeben sind, und dessen Betriebsstromstärke bei einer Normalleistung von 7 PS. etwa 13 Amp. beträgt, so kann man sich in Anbetracht der verhältnismäßig geringen Stromstärke für eine Anfahrtsstromstärke von 25 Amp. entschließen.

Unter Zugrundelegung dieser Stromstärke und der Motorklemmenspannung von $K = 500$ Volt läßt sich die erste Widerstandsstufe nach dem Ohmschen Gesetz bestimmen zu

$$w_1 = \frac{K}{J} = \frac{500}{25} = 20 \text{ Ohm}.$$

Bei Einschaltung dieses Widerstandes in den Motorstromkreis setzt sich der Motor in Bewegung und erhöht allmählich seine Geschwindigkeit. Die Folge davon ist, daß die elektromotorische Gegenkraft im Motor wächst und die Stromstärke abnimmt. Mit abnehmender Stromstärke sinkt aber zugleich die Zugkraft und Beschleunigung. Da nun, wie schon bemerkt, während der Anfahrtsperiode auf möglichst konstante Beschleunigung und somit konstante Stromstärke zu achten ist, müßte man, um dies einzuhalten, dem Sinken der Stromstärke entsprechend nach und nach den Widerstand verringern. Praktisch ist dies natürlich nicht durchzuführen, vielmehr kann der gesamte Vorschaltwiderstand sich aus nur wenigen Widerstandsstufen zusammensetzen, um die Schaltapparate nicht allzu kompliziert zu gestalten. Man sucht deshalb eine gleichmäßige Stromstärke dadurch zu erhalten, daß man ein Sinken der Stromstärke auf einen bestimmten niedrigsten Wert zuläßt und bei Erreichung dieses Wertes durch Abschalten von Widerstand die Stromstärke auf die ursprüngliche Höhe wieder emporbringt. Die Bestimmung dieses minimalen Wertes der Anfahrtsstromstärke hat

unter Berücksichtigung der Anzahl der Widerstandsstufen zu erfolgen. Je mehr Widerstandsstufen benutzt werden sollen, um so näher muß diese Stromstärke der maximalen liegen. Aus folgender Bestimmung des Vorschaltwiderstandes wird dies hervorgehen.

In Abb. 4 sei die Kurve der Umdrehungszahl pro Minute des Motors, dessen Betriebskurven in Abb. 3 dargestellt sind, in Abhängigkeit von der Stromstärke aufgezeichnet.

Aus der Kurve der Geschwindigkeiten (Abb. 3) und unter der Annahme, daß

V die Geschwindigkeit in km/St.,
n die Umdrehungen pro Minute,
R den Radius des Laufrades in m,
$1:\varphi$ das Uebersetzungsverhältnis

bedeutet, läßt sich mit Hülfe der Beziehung

$$n = \frac{V \cdot \varphi \cdot 1000}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot 60}$$

die Kurve der Umdrehungen pro Minute abhängig von der Stromstärke in Ampère leicht konstruieren.

Vom Nullpunkt des Koordinatensystems ausgehend (Abb. 4) sind nach links die Widerstände in Ohm aufgetragen.

Der Eigenwiderstand des Motors ist von dem gesamten Vorschaltwiderstand in Abzug zu bringen. Beträgt der Widerstand des Motors 1 Ohm, so ziehe man in Abb. 4 eine Senkrechte a im Abstand 1 Ohm vom Nullpunkte. Von dieser Linie aus sind die Stufen des Vorschaltwiderstandes zu bestimmen.

Während die maximale Anfahrtsstromstärke 25 Ampère beträgt, ist die minimale Anfahrtsstromstärke zu 18 Ampère angenommen worden. Diesen Punkten in Abb. 3 entsprechen die Punkte A und B der Kurve der Umdrehungen. Den auf der Geraden a dem Punkte A entsprechenden Punkt C verbindet man geradlinig mit Punkt E, der dem zur Stromstärke von 25 Ampère berechneten Widerstand von 20 Ohm entspricht.

Bei der Stromstärke von 18 Ampère würde der Vorschaltwiderstand betragen

$$w = \frac{K}{J} = \frac{500}{18} = 28 \text{ Ohm}.$$

Somit ist in Abb. 4, analog der vorhergehenden Konstruktion, Punkt D mit Punkt F geradlinig zu verbinden.

Wenn sich nun der Motor in Bewegung setzt, sinkt die Stromstärke allmählich von 25 auf 18 Ampère. Während dieser Zeit behält der gesamte Vorschaltwiderstand seine Größe von 19 Ohm bei. Das wird graphisch dadurch zur Anschauung gebracht, daß die Linie *E I* parallel zur Ordinatenachse verläuft. Sobald nun die Stromstärke den Wert von 18 Amp. erreicht hat, muß Widerstand ausgeschaltet werden, um die Stromstärke nicht tiefer sinken zu lassen. Dieser Moment tritt ein, wenn die Linie *E I* die Gerade *D F*, die der Stromstärke von 18 Amp. und dem Widerstand von 28 Ohm entspricht, schneidet. Beim Ausschalten von Widerstand schnellt die Stromstärke wieder in die Höhe, und zwar muß gerade soviel Widerstand ausgeschaltet werden, daß die Stromstärke den Wert von 25 Amp. wieder erreicht. Es muß also in Abb. 4 durch den Punkt *I* eine Parallele *I II* zur Abszissenachse gezogen werden. Die Senkrechte *II III* begrenzt den nunmehr vor den Motor zu schaltenden Widerstand, dessen Größe man zu 12,7 Ohm bestimmt. Nunmehr beginnt derselbe Vorgang von neuem, d. h. der Widerstand von 12,7 Ohm bleibt eingeschaltet, bis die Stromstärke wieder auf 18 Amp. gesunken ist.

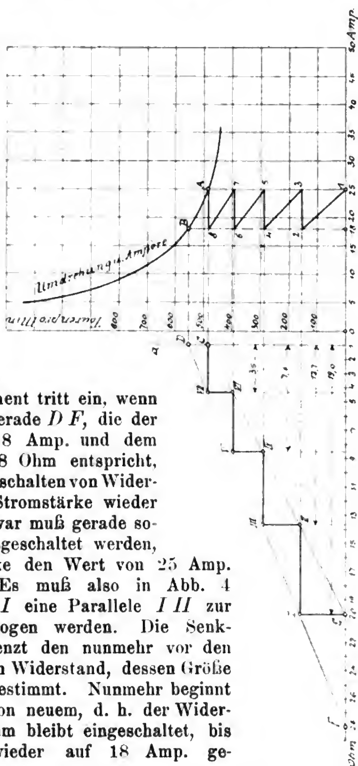


Abb. 4.

Auf diese Weise bestimmen sich in unserem Falle vier Vorschaltwiderstände zu 19,0, 12,7 , 7,6 und 3,5 Ohm.

Der Linienzug *E, I, II, III, IV, V, VI, VII* endet im Punkte *C*. Es ist dies ein Zeichen, daß die minimale Stromstärke von 18 Amp. richtig gewählt war, da nach Abschalten des gesamten Vorschaltwiderstandes wieder die Anfahrtsstromstärke von 25 Amp. erhalten wird. Sollte die durch Punkt *VII* gehende Horizontallinie nicht den Punkt *C* schneiden, so muß die minimale Stromstärke so lange verändert werden, bis der Linienzug *E, I, II*, ... in *C* endet.

Der Linienzug 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 veranschaulicht den Verlauf der Stromstärke während der Anfahrt.

Die hierher gehörende Sprague-Schaltung besteht darin, daß bei dem zweipoligen Motor die Feldwicklung in mehrere, meistens drei, Abteilungen geteilt ist. Beim Anlaufen des Motors liegen die einzelnen Abteilungen sämtlich in Hintereinanderschaltung. Zur Erhöhung der Geschwindigkeit werden die drei Spulen unter Zuhülfenahme verschiedener Zwischenschaltungen allmählich in die Parallelschaltung übergeführt. Besitzen die Motoren, wie dies heutzutage meistens der Fall sein wird, vier Pole, so macht sich eine Unterteilung der Erregerspulen unnötig, da die vier einzelnen Spulen in der erwähnten Weise geschaltet werden können.

Der Vorteil dieser Reguliermethode besteht darin, daß ein sehr wirtschaftliches Arbeiten des Motors erreicht wird, da nutzlose Energie in Vorschaltwiderständen nicht verloren geht. Dagegen besitzt die Methode bei Anwendung von zwei Motoren in einem Wagen insofern erhebliche Nachteile, als es vorkommen kann, daß einer der Motoren unzulässig hoch belastet wird, da nie die Stärke der Magnetfelder gleich groß sein kann. (*Sieber, E. T. Z. 1901, Heft 2.*)

Die Ab- und Zuschaltung der Widerstände geschieht bekanntlich mit Hülfe besonderer Steuerapparate, der sogen. Kontroller. Die Schaltung eines Kontrollers für einen Hauptstrommotor ist in Abb. 5 wiedergegeben. *Sp* bedeutet die Funkenlöschspule, die anderen Bezeichnungen sind ohne weiteres verständlich. Außer dem eigentlichen Kontroller befindet sich noch ein besonderer Umschalter im Stromkreis, der gestattet, die Richtung des Stromes zu wechseln, so daß die Drehrichtung des Motors geändert werden kann. Durch den Kontroller werden anfänglich fünf Widerstände in den Stromkreis eingeschaltet. Beim Drehen der Kontaktwalze auf die Stellungen 2, 3, 4 usw. werden diese Widerstände allmählich ausgeschaltet, bis schließlich auf Stellung 6 der Motor kurzgeschlossen ist und infolge-

dessen mit höchster Geschwindigkeit läuft. Denkt man sich die Kontaktfinger auf Stellung 1, so wäre der Stromlauf folgender:

Von der +-Schiene kommend nach 2 des Umschalters—*AA*—*AA* Anker—*A* Anker—*A* Umschalter—1 Umschalter—1 Kontaktfinger — 3 Kontaktfinger—Funkenlöschspule *Sp* — R_6 — R_1 — R_1 Kontaktfinger — *F* Kontaktfinger —*F* Feld—*E* Feld.— — Leitung.

Verfolgt man auf dieselbe Weise den Stromlauf z. B. auf Stellung 4, so wird man finden, daß drei Widerstandseinheiten ausgeschaltet sind. Bei der vorstehend beschriebenen Stellung der Schaltwalze ist der Umschalter auf der ersten Kontaktreihe stehend zu denken. Die Funkenlöschspule *Sp* muß selbstverständlich bei jeder Stellung eingeschaltet sein.

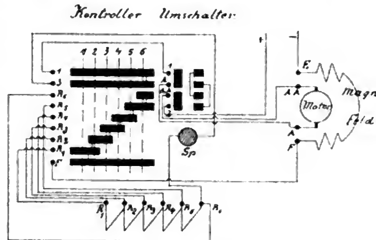


Abb. 5.

2. Serien-Parallelschaltung. Die besonders für Straßenbahnmotoren jetzt fast durchgängig angewandte Methode der Geschwindigkeitsregulierung ist die Serien-Parallelschaltung. Ihre Anwendung bedingt wenigstens zwei Motore, die in zwei Hauptschaltungen, die Serienschaltung und Parallelschaltung, zueinander gebracht werden. Hierdurch wird bereits die Reihenfolge der beiden Hauptschaltungen bedingt, denn dadurch, daß bei Hintereinanderschaltung der Motoren die Spannung an den Klemmen jedes einzelnen Motors gleich der Hälfte der Gesamtspannung ist, besitzt auch die Geschwindigkeit in Hintereinanderschaltung etwa den halben Wert der Geschwindigkeit in Parallelschaltung, gleiche Bauart und Größe der Motoren vorausgesetzt.

Somit werden bei Ingangsetzung des Wagens beide Motoren in Hintereinanderschaltung gebracht und außerdem in den meisten Fällen noch Widerstände vorgeschaltet, da die Stromstärke bei der Anfahrt unzulässig hoch anwachsen würde. Diese Vorschaltwiderstände werden auch im Verlaufe der Schaltung aus der Serien- in die Parallelschaltung in mehr oder weniger hohem Maße mit verwendet, so daß sich die Serien-Parallel-

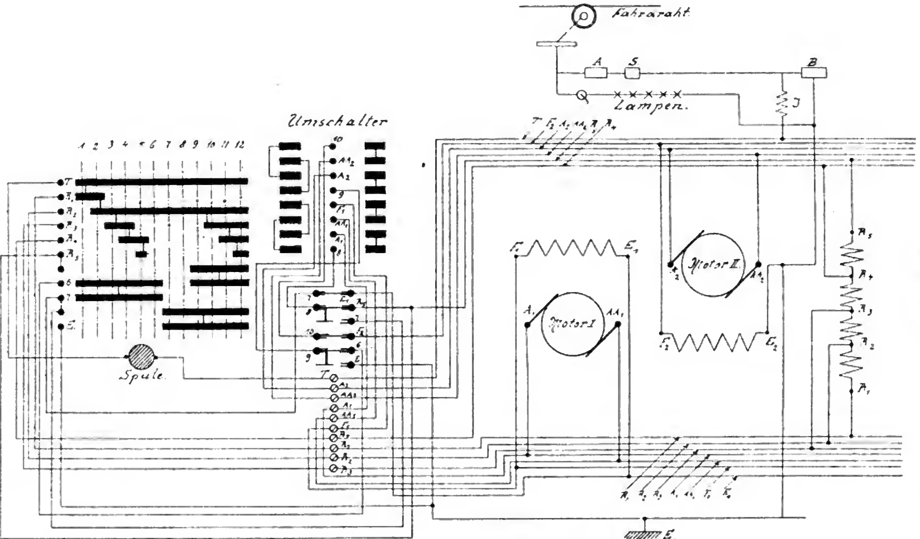


Abb. 6.

schaltung auch gleichzeitig der reinen Regulierung mittels Vorschaltwiderstände bedient. In Abb. 6 ist diese Schaltungsart für zwei Bahnmotoren durchgeführt.

Im ganzen sind 12 Schaltstufen zu unterscheiden. Zur eventuellen Aenderung der Stromrichtung dient ein besonderer kleiner Umschalter, der jedoch nur betätigt werden kann, wenn die Walze des Kontrollers auf der Ausschaltestellung steht, so daß ein Umschalten unter Strom nie stattfinden kann. Die Leitungen werden von außen zunächst nach einem Schaltbrett

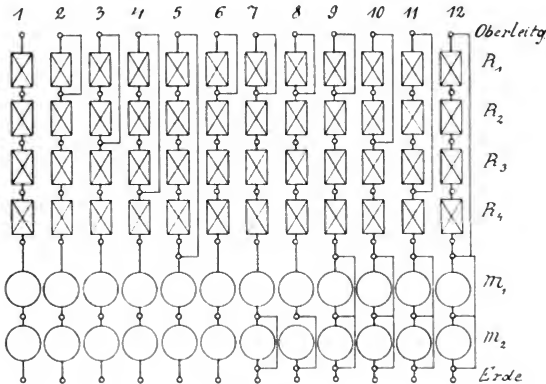


Abb. 6 a.

im Kontrollergehäuse geführt, auf dem auch durch Umschalter die Leitungen so verbunden sind, daß im Notfall nach erfolgter Umschaltung mit nur einem Motor gefahren werden kann. In Abb. 6 a findet man die 12 Stellungen der Kontaktwalze wieder. Aus diesem Schaltungsschema ist ersichtlich, in welcher Weise die einzelnen Motoren und Widerstände in jeder Fahrstellung zueinander geschaltet sind. In Stellung 1 müssen z. B. sämtliche Widerstände und Motoren hintereinander geschaltet sein. Der Stromlauf, den man aus Abb. 6 ersehen kann, wäre folgender:

Fahrdraht—Ausschalter A—Sicherung S—Induktionsspule J —Widerstand R_1—Widerstand R_5—Schaltbrett R_5 durch den Umschalter nach Schaltbrett 8—Ankerstromumschalter 8—Kontaktfinger A_1—Schaltbrett A_1—Motor A_1—Motor AA_1—Schaltbrett AA_1—Ankerstromumschalter AA_1—Kontaktfinger F_1—Schaltbrett F_1—Feldspule F_1—Feldspule E_1—Schaltbrett E_1—Schaltbrett 7—Kontaktfinger 7—Kontaktfinger 6—Schaltbrett 6—

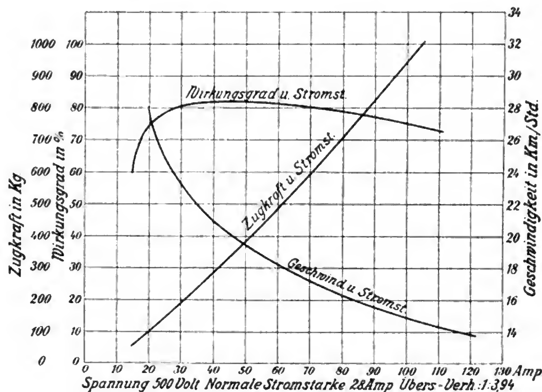


Abb. 7.

durch den Umschalter nach Schaltbrett 9 — Ankerstromumschalter 9 — Kontaktfinger A_2 — Schaltbrett A_2 — Motor A_2 — Motor AA_2 — Schaltbrett AA_2 — Ankerstromumschalter AA_2 — Kontaktfinger 10—Schaltbrett 10—Schaltbrett F_2—Feldspule F_2 —Feldspule E_2—Erde.

Auf dieselbe Weise lassen sich die Stromläufe der übrigen Stellungen verfolgen. In Abb. 6 ist nur ein Kontroller gezeichnet. In Wirklichkeit befinden sich bekanntlich auf einem Straßenbahnwagen zwei, vorn und hinten je einer, die parallel geschaltet sind, um von jedem aus die Motoren bedienen zu können.

Bei der Berechnung der Vorschaltwiderstände, die bei der Serien-Parallelschaltung benutzt werden, kann in derselben Weise

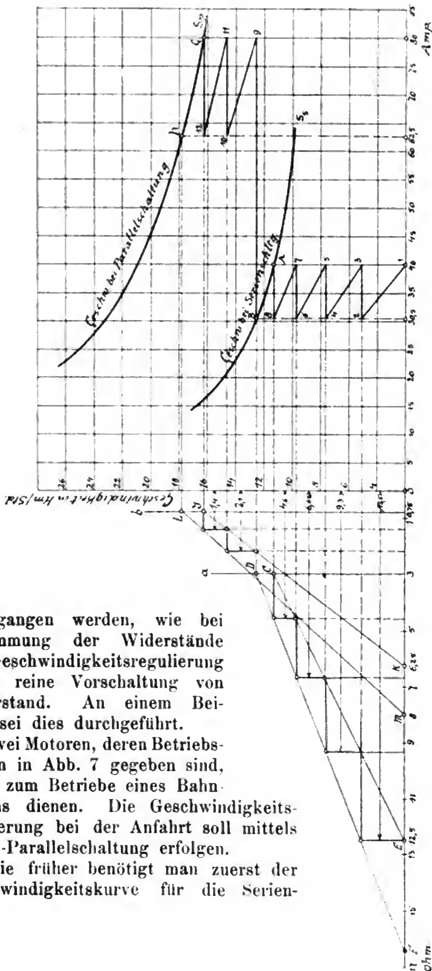


Abb. 8.

vorgegangen werden, wie bei Bestimmung der Widerstände für Geschwindigkeitsregulierung durch reine Vorschaltung von Widerstand. An einem Beispiel sei dies durchgeführt.

Zwei Motoren, deren Betriebskurven in Abb. 7 gegeben sind, sollen zum Betriebe eines Bahnwagens dienen. Die Geschwindigkeitsregulierung bei der Anfahrt soll mittels Serien-Parallelschaltung erfolgen.

Wie früher benötigt man zuerst der Geschwindigkeitskurve für die Serien-

schaltung. Bezeichnet man die Werte der Geschwindigkeit für Parallelschaltung mit s_p, für Serienschaltung mit s_s, so ist, wie oben bereits erwähnt,

$$s_s = \frac{1}{2} s_p.$$

Die Kurven s_s und s_p lassen sich somit direkt den Betriebskurven der Motoren entnehmen. Beträgt ferner der Widerstand eines Motors 1,5 Ohm, die Anfahrtsstromstärke bei Serienschaltung 40 Ampère und die minimale Anfahrtsstromstärke, 30,5 Ampère, so erhält man in Abb. 8 die beiden Linien *CE* und *DF*, nachdem die Senkrechte *a* im Abstand von $2 \times 1,5 = 3,0$ Ohm vom Koordinatenanfange entfernt zur Ordinatenachse parallel gezogen wurde.

Solange die Motoren in Serie geschaltet sind, machen sich somit vier Vorschaltwiderstände nötig, deren Größe 9,5, 6,3, 3,65, 1,6 Ohm betragen. Während die Stromstärke von *A* bis *B* abfällt, laufen die Motoren ohne jeden Vorschaltwiderstand in Hintereinanderschaltung, hierauf erfolgt die Parallelschaltung der Motoren, wobei zu beachten ist, daß durch die nunmehr verwendeten Widerstände die doppelte Stromstärke, also maximal $40 \times 2 = 80$ Ampère fließen muß, wenn jeder der Motoren mit 40 Amp. maximal belastet sein soll. Wir müssen jetzt also, da die Widerstände mit doppelter Stromstärke belastet werden, in der graphischen Darstellung dies dadurch zum Ausdruck bringen, daß die Stromstärken verdoppelt und nunmehr auf die Geschwindigkeitskurve für Parallelschaltung bezogen werden. Man erhält somit die beiden Punkte *G* und *H*. Die Widerstände für die Parallelschaltung bestimmen sich auf dieselbe Weise wie die Widerstände der Serienschaltung, nur ist zu beachten, daß der gesamte innere Widerstand der beiden parallel geschalteten Motore jetzt nur noch $\frac{1}{2} \cdot 1,5 = 0,75$ Ohm beträgt, wodurch die Senkrechte *b* erhalten wird.

Durch die Stromstärken 80 und 62,5 Amp. und die Linien *JK* und *LM* werden die beiden Vorschaltwiderstände 1,25 Ohm und 0,65 Ohm bestimmt.

Durch die Linie 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, *A*, *B*, 9, 10, 11, 12, *G*, *H* ist der Verlauf der Stromstärke gegeben.

Da man, um an Material und Gewicht zu sparen, als Widerstände der Parallelschaltung möglichst die Widerstände der Serienschaltung benutzt, so würde man in unserem Beispiel nur vier Widerstände im Wagen zum Einbau bringen und die

beiden kleinsten Widerstände der Serienschaltung etwas verkleinern, so daß sich dieselben besser den bei der Parallelschaltung nötigen Widerständen anpassen. Von einer vollkommenen exakten Berechnung der Widerstände kann somit keine Rede sein. Außerdem hängt es außerordentlich von der Geschicklichkeit des Wagenführers ab, ob der Verlauf der Stromstärke und die damit erzielte gleichmäßige Wagenbeschleunigung eingehalten wird, da selbstverständlich das Abschalten der einzelnen Vorschaltwiderstände im richtigen Zeitmoment zu erfolgen hat.

Da, wie früher bereits bemerkt, der Energieverbrauch während des Anfahrens eines elektrisch betriebenen Fahrzeuges den normalen Energieverbrauch bedeutend übersteigt und deshalb diese Verluste besonders bei Bahnen mit vielen Haltestellen und Kurven einen beträchtlichen Teil des gesamten Energieverbrauches ausmachen, ist es wünschenswert, die Vorgänge während der Anfahrt in übersichtlicher und einfacher Weise erkennen zu können.

Hierzu kann man sich am besten der graphischen Methode bedienen, mit deren Anwendung in Abb. 9 die Stromstärke, Zugkraft, die Bahnwiderstände und der zurückgelegte Weg in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit dargestellt sind.

Nehmen wir z. B. an, ein elektrisch betriebener Straßenbahnwagen, ausgerüstet mit zwei Motoren, deren Betriebskurven in Abb. 7 gegeben sein sollen, fahre auf horizontaler Strecke an. Die Fahrgeschwindigkeit werde mittels Serien-Parallelschaltung reguliert, und die hierzu erforderlichen Widerstände sollen nach Abb. 8 bestimmt sein. Ferner betrage das gesamte zu befördernde Gewicht 17 Tonnen und die Geschwindigkeit, auf die der Wagen zu bringen ist, 6,7 m/sec.

Die Stromstärke in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit ist durch den Linienzug 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 dargestellt. Den Endpunkt 16 erhält man aus der Ueberlegung, daß die Zugkraft, die zur Ueberwindung der reinen Bahnwiderstände nötig ist, beträgt

$$Z = (Q + P) \cdot (f + s) \text{ kg},$$

worin $Q + P$ das zu befördernde Gewicht in t, f den Traktionskoeffizient und s die Steigung bedeutet.

Setzt man die gegebenen Werte ein, so erhält man

$$Z = 17 \cdot 10 = 170 \text{ kg}.$$

Zu diesem Werte $Z = 170$ kg entnimmt man den Betriebskurven der Motoren (Abb. 7) eine Stromstärke von 28 Amp.

Somit ist Punkt 16 bestimmt. Die Kurve zwischen den Punkten 15 und 16 wird ebenfalls an Hand der Motorkurven konstruiert, indem man z. B. findet, daß zu einer Geschwindigkeit von 6 m/sec = 21,6 km/St. eine Stromstärke von ca. 37 Amp. gehört.

Von Punkt 16 ab erfährt der Wagen keine Beschleunigung mehr, so daß nur noch die Bahnwiderstände zu überwinden sind, um den Wagen in gleichmäßiger Geschwindigkeit zu er-

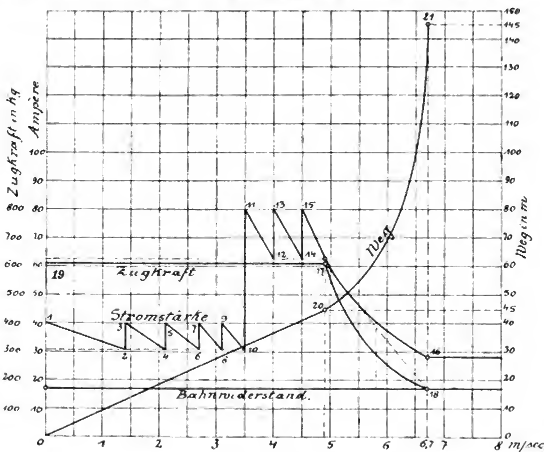


Abb. 9.

halten. Deshalb muß auf gerader, horizontaler Strecke der Stromverbrauch etwa 28 Amp. dauernd betragen.

Den Berechnungen der Widerstände ist bereits oben eine gleichmäßige Beschleunigung, d. h. eine gleichmäßige Zugkraft zugrunde gelegt worden. Diese Zugkraft entspricht der mittleren Schaltstromstärke von $\frac{62,5 + 80}{2} = \sim 71$ Ampère.

Nach Abb. 7 beträgt die zu dieser Stromstärke gehörige Zugkraft 610 kg. Indem also auf der y-Achse des Koordinatensystems in Abb. 9 die Zugkräfte einheitlich aufgetragen werden, erhält man die während der Schaltperiode wirksame mittlere

Zugkraft als die Linie 19, 17, 18. Die Kurve der reinen Bahnwiderstände, d. h. die Zugkraft, die zur Ueberwindung der Reibungs- und Luftwiderstände aufgewendet werden muß, beträgt, wie berechnet, 170 kg. In diese Gerade, parallel zur Abszissenachse, muß selbstverständlich nach Erreichung der Geschwindigkeit von 6,7 m/sec, also im Punkte 18, die Kurve der beschleunigenden Zugkraft übergehen. Die Kurve 17 bis 18 folgt ebenfalls aus dem Motordiagramm.

Weiterhin ist es zweckmäßig, auch den vom Wagen zurückgelegten Weg in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit zu bringen. Die zur Berechnung der Beschleunigung zur Verfügung stehende Zugkraft ist 610 — 170 = 440 kg.

Somit erhält die Beschleunigung p den Wert

$$p = \frac{Z}{M} = \frac{Z \cdot g}{G} = \frac{10 \cdot 440}{17\,000} = 0{,}27 \text{ m/sec}^2.$$

Wie aus Abb. 9 ersichtlich ist, besitzt der Wagen nach erfolgter Widerstandsschaltung während der Anfahrt eine Geschwindigkeit von 4,9 m/sec. Bezeichnet man allgemein diese Endgeschwindigkeit mit v und den Weg, den der Wagen bis zur Erreichung dieser Geschwindigkeit zurücklegt, mit l, so ist

$$l = \frac{v^2}{2p} = \frac{24}{2 \cdot 0{,}27} = 45 \text{ m}.$$

Die Einheiten des zurückgelegten Weges sind in Abb. 9 rechts angegeben. Wie ersichtlich, hat nach einem Wege von 45 m der Wagen eine Geschwindigkeit von 4,9 m/sec erreicht. Von diesem Augenblick an wird kein Widerstand mehr abgeschaltet, so daß die Stromstärke und zugleich Zugkraft allmählich auf 28 Amp. bzw. 170 kg herabsinken.

Da während der Anfahrtsperiode eine gleichmäßige Beschleunigung von 0,27 m/sec² vorausgesetzt wurde, ist die Kurve 0 20, die den zurückgelegten Weg versinnbildlicht, eine gerade Linie. Von Punkt 20 an ändert sich jedoch die Sache, da die Zugkraft von diesem Augenblick an von dem Wert 17 allmählich auf den Wert 18 herabsinkt. Die Kurve 20 21 kann deshalb keine gerade Linie sein.

Entnimmt man der Kurve der Zugkraft 17 bis 18 eine mittlere Beschleunigung von 0,13 m/sec² und bezeichnet man mit c die Endgeschwindigkeit von 6,7 m/sec, so berechnet sich der vom Wagen zurückgelegte Weg 20 21 zu

$$l_1 = \frac{c^2 - v^2}{2p} = \frac{45 - 24}{2 \cdot 0{,}13} = 100 \text{ m}.$$

Die Endgeschwindigkeit von 6,7 m/sec wird somit nach insgesamt

$$100 + 45 = 145 \text{ m}$$

erreicht. Die Kurve 20 21 verläuft etwa parabolisch und ist auch so in Abb. 9 eingezeichnet.

Aus Abb. 9 läßt sich ohne Mühe die Geschwindigkeit, die Stromstärke und Leistung als Funktion des zurückgelegten Weges darstellen. Dies ist in Abb. 10 durchgeführt. Hierzu ist zu bemerken, daß zur besseren Uebersicht die Abszissen-

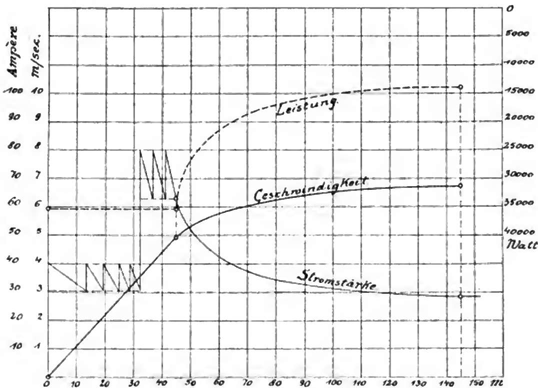


Abb. 10.

achse zur Darstellung der Leistungseinheiten oben an die Abbildung gelegt ist. Die Leistung berechnet sich als das Produkt aus Stromstärke und Spannung; für die Stromstärke ist ein mittlerer Wert angenommen.

3. Shunt-Methode. Bei dieser Art der Geschwindigkeitsregulierung wird, ähnlich wie bei der Sprague-Schaltung, die Stärke des magnetischen Feldes geändert, indem parallel zu den Magnetspulen ein veränderlicher Widerstand geschaltet wird. Durch Schwächung der Magnetisierung wird die Geschwindigkeit erhöht. Die Größe des erforderlichen Nebenschlußwiderstandes

(Shunt) w (Abb. 11) läßt sich für eine verlangte Tourenzahl bestimmen.

Bezeichnet E_0 die elektromotorische Kraft der leerlaufenden Maschine, $\mathfrak{v}$ die Winkelgeschwindigkeit des Ankers, J die Stromstärke im Anker, J_m die Stromstärke in der Magnetwicklung, W_m den Widerstand der Magnetwicklung, E die elektromotorische Kraft der belasteten Maschine, die bei Aufnahme der Hopkinsonschen Charakteristik in Frage kommt, so läßt sich die Deprezsche Charakteristik der Maschine als Funktion der Stromstärke durch die Beziehung $\frac{E_0}{\mathfrak{v}} = F(J)$ darstellen.



Abb. 11.

Wird diese Kurve um die Kurve der Ankerrückwirkung

$$\frac{J \cdot w_a}{\mathfrak{v}} = f(J)$$

vermindert, wobei w_a den Widerstand des Ankers bedeutet, so erhält man bekanntlich die äußere (Hopkinsonsche) Charakteristik. In Abb. 12 sind die Deprezsche Charakteristik und die Kurve der Ankerrückwirkung als gegeben zu betrachten. Bei der Aufnahme dieser Kurve war die Größe des Nebenschusses

$$w = \infty \text{ Ohm.}$$

Es fragt sich nun, wie die Hopkinsonsche Charakteristik gefunden wird, wenn man der Magnetwicklung einen beliebigen Widerstand, z. B. $w = 2\,W_m$ parallel schaltet (Abb. 11). Allgemein ist

$$J_m = J \cdot \frac{w}{W_m + w};$$

setzt man $w = 2\,W_m$, so wird

$$J_m = \frac{2}{3} \cdot J.$$

Mit Hülfe dieser Beziehung läßt sich die Hopkinsonsche Charakteristik leicht entwerfen. Für einen Punkt, und zwar für $J = 12$ Amp. ist die Konstruktion dieser neuen Kurve in Abb. 12 durchgeführt. Von dem Punkte 1 der Kurve der Ankerrückwirkung ausgehend, berechnet sich J_m zu

$$J_m = \frac{2}{3}\,J = \frac{2}{3} \cdot 12 = 8 \text{ Amp.}$$

Man zieht somit eine Horizontale 1, 2 bis zur Ordinate des Punktes $J = 8$ Amp. und schlägt um den Punkt 8 den Punkt 2 nach 3 auf die Abszissenachse des Koordinatensystemes herab. Hierauf errichtet man in 3 eine Senkrechte, welche die Deprezsche Charakteristik im Punkte 4 schneidet. Durch Punkt 4 zieht man eine Parallele zur Abszissenachse, welche die Ordinate des Punktes $J = 12$ Amp. im Punkte 5 schneidet. 5 ist ein Punkt der gesuchten Kurve. Indem diese Konstruktion für mehrere Werte von J durchgeführt wird, erhält man die Hopkinsonsche Charakteristik der Maschine

$$f(J) \text{ für } w = 2\ W_m.$$

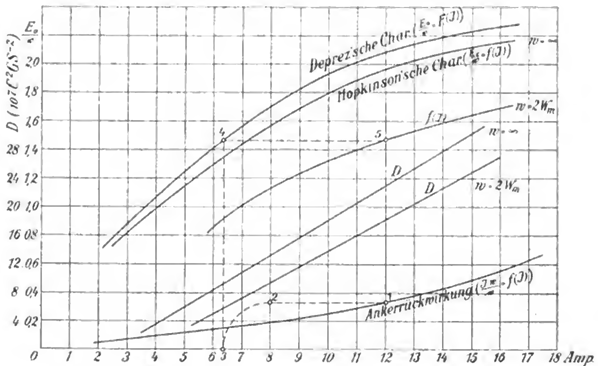


Abb. 12.

Die Kurve, die das Drehungsmoment des Motors, ausgedrückt in Joule, in Abhängigkeit von der Stromstärke liefert, wird gefunden, indem man für verschiedene beliebige Werte von J die zugehörigen Werte der Größe $\frac{E_o}{\mathfrak{v}}$ bzw. $\frac{E}{\mathfrak{v}}$ bestimmt. Unter Benutzung der Beziehungen

$$D \cdot \mathfrak{v} = E \cdot J$$

und

$$D = \frac{E}{\mathfrak{v}} \cdot J = f(J) \cdot J$$

lassen sich zu den jeweiligen Werten von J und $\frac{E}{\mathfrak{v}}$ die Größen der Drehungsmomente berechnen.

In Abhängigkeit von J erscheint D, graphisch dargestellt, als gerade Linie. Es genügt somit, zwei Punkte dieser Geraden zu bestimmen. Für $w = \infty$, d. h. unter Benutzung der anfänglich gefundenen Hopkinsonschen Charakteristik, erhält man für

$$J = 4 \text{ Ampère } \frac{E}{\mathfrak{v}} = 0{,}89, \text{ somit } D = \frac{E}{\mathfrak{v}} \cdot J = 0{,}89 \cdot 4 = 3{,}56 \text{ Joule.}$$

$$J = 10 \text{ Ampère } \frac{E}{\mathfrak{v}} = 1{,}8, \text{ somit } D = \frac{E}{\mathfrak{v}} \cdot J = 1{,}8 \cdot 10 = 18{,}00 \text{ Joule.}$$

Auf dieselbe Weise findet man die Linie der Drehungsmomente, gehörig zur Hopkinsonschen Charakteristik bei $w = 2\ W_m$, indem man findet für

$$J = 8 \text{ Ampère } \frac{E}{\mathfrak{v}} = 1{,}17, \text{ somit } D = \frac{E}{\mathfrak{v}} \cdot J = 1{,}17 \cdot 8 = 9{,}36 \text{ Joule.}$$

$$J = 15 \text{ Ampère } \frac{E}{\mathfrak{v}} = 1{,}66, \text{ somit } D = \frac{E}{\mathfrak{v}} \cdot J = 1{,}66 \cdot 15 = 24{,}8 \text{ Joule.}$$

Besitzt nun z. B. der Motor normal eine minutliche Tourenzahl von 1024, beträgt ferner die Klemmenspannung des Motors $K = 212$ Volt und das Drehungsmoment $D = 16$ Joule, so erhält man:

$$\frac{E}{\mathfrak{v}} = 1{,}4 \text{ für } J = 11 \text{ Ampère und } w = 2\ W_m.$$

Soll ferner der Ankerwiderstand w_a und der Magnetwiderstand W_m des Motors je 2,06 Ohm betragen, so berechnet sich der Gesamtwiderstand zu

$$W = 2{,}06 + \frac{2{,}06 \cdot 4{,}12}{4{,}12 + 2{,}06} = 3{,}43 \text{ Ohm;}$$

demnach ergibt sich aus der Beziehung:

$$\frac{E}{\mathfrak{v}} = 1{,}4 = \frac{K - J \cdot W}{\mathfrak{v}}$$

der Wert:

$$\mathfrak{v} = \frac{K - J \cdot W}{1{,}4} = \frac{212 - 11 \cdot 3{,}43}{1{,}4} = 124,$$

somit beträgt die Tourenzahl pro Minute:

$$z = \frac{60 \cdot \mathfrak{v}}{2\pi} = \frac{60 \cdot 124}{2 \,.\, 3{,}14} = 1185.$$

Die Tourenzahl ist somit gestiegen. Auf diese Weise lassen sich eine beliebige Anzahl Nebenschlußwiderstände verschiedener Größe sukzessiv den Magnetwindungen parallel schalten und die Geschwindigkeiten des Motors variieren.

Gesondert wird die Methode der Nebenschließung nur selten in Anwendung gebracht. Dagegen findet man sie häufig in Verbindung mit der Serien-Parallelschaltung.

4. Spannungsänderung an der Elektrizitätsquelle. Wird die aus einer Akkumulatorenbatterie bestehende Stromquelle im Fahrzeug selbst mitgeführt, wie dies bei Kraftwagen und mitunter bei Straßenbahnen geschieht, so kann die Geschwindigkeit dadurch geändert werden, daß man die Spannung der Stromquelle selbst veränderlich macht. Durch Unterteilung der gesamten Batterie in zwei oder drei Teile erhält man, den verschiedenen Spannungen entsprechend, verschiedene Fahrgeschwindigkeiten. Da bei dieser Regulierungsart besondere Vorschaltwiderstände nicht zur Anwendung kommen und somit Energieverluste durch die Geschwindigkeitsänderungen an sich nicht auftreten, arbeitet diese Methode äußerst ökonomisch. Allerdings ist es erforderlich, daß die Spannungen der einzelnen Batterieteile vollkommen gleich sind, da sonst Ausgleichströme zwischen den Zellen der verschiedenen Gruppen auftreten können, wodurch Ueberladungen einzelner Zellen und baldiges Schadhaftwerden eintreten kann.

β) Der Nebenschlussmotor.

Der Nebenschlußmotor findet für elektrische Traktionszwecke eine nur sehr beschränkte Anwendung. Besondere Schwierigkeiten bietet die Parallelschaltung zweier Nebenschlußmotoren und die Regulierung ihrer Geschwindigkeit. Der Nebenschlußmotor besitzt bei weitem nicht in so hohem Maße die Fähigkeit, unter starker Belastung anzugehen wie der Hauptstrommotor. Da ferner die Magnetwicklung im Nebenschluß liegt und an ihren Enden eine fast stets konstante Spannung herrscht, so zeigt der Motor das Bestreben, stets mit gleicher Geschwindigkeit zu laufen, sei er überlastet oder nicht. Infolgedessen ist der Stromverbrauch dieses Motors ein höherer

als der des Hauptstrommotors. Von dieser Eigenschaft kann man sich durch folgendes überzeugen.

Es bedeute

E die elektromotorische Kraft des Motors,
z die minutliche Tourenzahl,
$\mathfrak{v} = \frac{2\pi \cdot z}{60}$ die Winkelgeschwindigkeit,
J_m die Stromstärke in den Magnetwindungen,
J_a die Stromstärke im Anker,
K die Klemmenspannung des Motors,
w_a den Ankerwiderstand,
D das Drehungsmoment.

Dann ist

$$\frac{E}{v} = f(J_m)$$

$$E = K - J_a \cdot w_a,$$

hieraus folgt

$$J_a = \frac{K - E}{w_a},$$

somit

$$D = \frac{K}{w_a} \cdot f(J_m) - \frac{\mathfrak{v}}{w_a} \cdot [f\,J_m)]^2,$$

hieraus folgt

$$\mathfrak{v} = \frac{\frac{K}{w_a} \cdot f(J_m) - D}{\frac{[f(J_m)]^2}{w_a}} = \frac{K}{f(J_m)} - \frac{D \cdot w_a}{[f(J_m)]^2};$$

ändert sich nun das Drehungsmoment D, so hat eine solche Aenderung wegen der Kleinheit des Wertes $\frac{w_a}{[f(J_m)]^2}$ wenig Einfluß auf die Größe der Geschwindigkeit $\mathfrak{v}$.

Ein guter Motor muß deshalb bei verschiedener Belastung eine nahezu konstante Tourenzahl aufweisen.

Anwendung könnte ein Nebenschlußmotor für Traktion höchstens dann finden, wenn Unregelmäßigkeiten im Betriebe, bestehend in wesentlichen Steigungen und Geschwindigkeitsänderungen der Strecke nicht zu erwarten sind.

Die Berechnung der Vorschaltwiderstände und der Widerstände bei Serien-Parallelschaltung hat in derselben Weise zu

erfolgen wie beim Hauptstrommotor. Die Vorschaltwiderstände werden nur vor den Anker gelegt. Aeußerst ökonomisch gestaltet sich beim Nebenschlußmotor selbstverständlich die Regulierung der Geschwindigkeit durch Aenderung der Erregung. Am meisten hat die Methode der Vorschaltung von Widerständen in den Ankerstromkreis Anwendung gefunden. Die Anfahrt eines Fahrzeuges mit Nebenschlußmotoren gestaltet sich nach vorstehendem ebenfalls in ähnlicher Weise wie bei den Hauptstrommotoren.

B. Wechselstrommotoren.

Von den Wechselstrommotoren können für den Bahnbetrieb nur die asynchronen Wechselstrommotoren in Betracht kommen, da die synchronen Motoren bekanntlich nicht von selbst angehen.

Von den mehrphasigen Wechselstrommotoren hat nur der dreiphasige (Drehstrom-)Motor Anwendung finden können, da dessen Wirkungsweise weit günstiger ist als die des zweiphasigen Wechselstrommotors.

Aehnlich wie der Nebenschlußmotor arbeitet der Drehstrommotor nur dann rationell, wenn starke wechselnde Steigungen, häufige Anfahrten und Geschwindigkeitsänderungen nicht zu erwarten sind. Während die Geschwindigkeit des Hauptstrommotors bekanntlich mit wachsender Zugkraft abnimmt, ist der Drehstrommotor stets bestrebt, auch bei höherer geforderter Zugkraft die gleiche Geschwindigkeit beizubehalten. Infolgedessen wird der Drehstrombetrieb im allgemeinen im Straßenbahnbetriebe kaum Verwendung finden. Dazu kommt noch, daß, da bekanntlich drei Stromzuleitungen nötig sind, bei Mitbenutzung der Schienen als Leiter, zwei Leitungsdrähte durch die Straßen zu spannen sind. Aesthetische Gründe und komplizierte Leitungskonstruktionen in Weichen werden auch deshalb die Verwendung des Drehstromes verbieten.

Ganz anders liegen die Verhältnisse allerdings bei Vollbahnen, deren Geschwindigkeit mehr oder weniger eine konstante ist, deren Steigungsverhältnisse wegen des Vorhandenseins eines eigenen Bahnkörpers meistens nicht allzu groß sind und deren Kraftbedarf infolgedessen in nur verhältnismäßig engen Grenzen schwankt, so daß die Motoren mit fast stets gleichmäßiger Geschwindigkeit laufen können.

Der eigene Bahnkörper ermöglicht auch eine praktische und billige Anordnung der Oberleitungsdrähte, so daß dieselben

nicht nebeneinander, sondern übereinander angeordnet werden können, wie dies zuerst von Siemens & Halske geschehen ist. Die Zuführungsdrähte liegen am besten seitwärts über den Schienen in einer Höhe von 6—8 m und sind an besonders konstruierten Isolatoren befestigt. Bei Vollbahnen kann außerdem die Spannung in den Leitungen beliebig hoch gewählt werden, was bei Straßenbahnen nicht möglich ist. Bei allen Vorortbahnen, Vollbahn- und Schnellbahnbetrieben hat sich der Drehstrommotor gut bewährt und sich vielfach dem Gleichstrommotor überlegen gezeigt.

Die Stromzuführung zu den Motoren kann auf zweierlei Art erfolgen. Einmal kann der hochgespannte Strom den Motoren direkt ohne Zwischenschaltung eines Transformators, das andere Mal nach erfolgter Herabtransformierung zugeführt werden. Das erste System ist von Siemens & Halske unter Verwendung von Drehstrommotoren für 3000 Volt Spannung versuchsweise eingeführt worden.

Die Umwandlung des hochgespannten Drehstromes in solchen niederer Spannung kann in Unterstationen erfolgen, von denen aus dann den Fahrzeugen der Strom von mäßiger Spannung zugeführt wird.

Ferner kann der hochgespannte Drehstrom auch direkt den Wagen zugeführt und in diesen selbst herabtransformiert werden. (Versuchsbahn Großlichterfelde-Zossen.)

Um die Vorteile der einfachen, verhältnismäßig schwachen, Leitung einer Gleichstrombahn und hoher Netzspannung von Drehstrombahnen gleichzeitig in einer Anlage vereinigen zu können, hat man seit längerer Zeit mit Erfolg versucht, das Einphasen-Wechselstromsystem für den Bahnbetrieb nutzbar zu machen. Bei Anwendung einer Lokomotive kann der durch die Kontaktleitung zugeführte hochgespannte einphasige Wechselstrom durch einen rotierenden Umformer in Gleichstrom verwandelt und dieser zum Betriebe der Motoren verwendet werden.*) Hierbei benutzt die Maschinenfabrik Oerlikon nicht die übliche Methode der Geschwindigkeitsregulierung, bei der Widerstände in den Stromkreis geschaltet werden, sondern sie bewerkstelligt die Regulierung durch Minderung der Gleichstromerregung des Umformers. Hierdurch wird ein äußerst ökonomischer Betrieb erzielt, da keine Energieverluste in Widerständen auftreten können.

*) *E. T. Z. 1902, Heft 45.*

An Stelle eines rotierenden Umformers kann prinzipiell am zweckmäßigsten ein Einphasen-Wechselstrommotor treten, weil dadurch die Vorteile der einfachen Leitung und der direkten Motorspeisung gewahrt bleiben. Seit Jahren ist man deshalb bestrebt gewesen, Einphasenmotoren, und zwar Einphasen-Kollektormotoren zu bauen, die inbezug auf Geschwindigkeit und Drehmoment dem Gleichstrom-Serienmotor gleichgestellt werden können. Die Einphasenmotoren neuester Konstruktion laufen mit hohem Drehmoment als Serienmotoren an und sodann als Induktionsmotoren weiter.*)

Die Geschwindigkeitsregulierung der Wechselstrommotoren. Die Regulierung der Geschwindigkeit der Wechselstrommotoren kann auf ähnliche Weise erfolgen wie bei Gleichstrom, indem in den Stromkreis des Rotors Widerstände eingefügt werden. Bei gleichbleibender Zugkraft wird der Motor seine Geschwindigkeit beliebig ändern. Diese Reguliermethode besitzt ebenso wie bei Gleichstrom den Nachteil der Energieverluste in den Vorschaltwiderständen. Die Schaltungsweise wird durch Abb. 13 gekennzeichnet.

Bei Stellung 1 der Kontaktwalze ist der Stromlauf für den Stator des Motors folgender:

1. Phase: L_1—Kontaktfinger L_1—F_1—Motor,
2. Phase: L_2—Kontaktfinger L_2—F_2—Motor,
3. Phase: L_3—Kontaktfinger L_3—F_3—Motor.

Der Stromlauf für den Rotor wäre:

1. Phase: Kontaktfinger 1 a—Widerstand 1 a—A_1—Motor,
2. Phase: Kontaktfinger 1 b—Widerstand 1 b—A_2—Motor,
3. Phase: Kontaktfinger 1 c—Widerstand 1 c—A_3—Motor.

Schaltet man die Walze auf Stellung 2, so werden die Widerstände zwischen 1 a—2 a, 1 b—2 b, 1 c—2 c kurzgeschlossen, treten praktisch also außer Wirkung. Auf Stellung 5 endlich sind sämtliche Widerstände ausgeschaltet, die Rotorstromkreise sind somit kurz geschlossen.

Soll ein derartiger Kontroller zur Bedienung eines Motors benutzt werden, der seine Drehrichtung ändern muß, so hat man sich die Kontaktanordnung in Abb. 13 auch links von den Kontaktfingern angebracht zu denken. Die Verbindung der Kontakte untereinander wäre dieselbe, nur daß zwei Phasen des Motors vertauscht sein müssen.

*) *E. T. Z. 1902, Heft 16.*

Bei vorstehend gezeichnetem Kontroller beträgt die Anzahl der Kontaktfinger 21, so daß der Steuerapparat unter Umständen wegen dieser bedeutenden Zahl von Kontakten konstruktive Schwierigkeiten bieten kann. Durch eine besondere Schaltung der Widerstände kann jedoch die Zahl der Kontakte wesentlich verringert werden, ohne das sichere Funktionieren des Motors zu beeinträchtigen. Die Einrichtung eines solchen Kontrollers zeigt Abb. 14. Es kommen nur 14 Kontakte zur Verwendung. Eine Anzahl Widerstände ist fest unter sich in Dreieckschaltung und mit einem der Schleifringe des Drehstrommotors *B* ver-

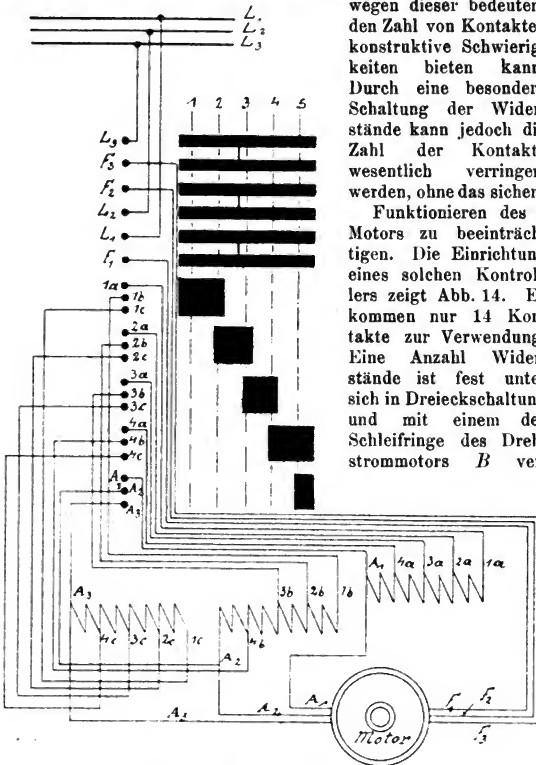


Abb. 13.

bunden. Diese Widerstände werden nun nacheinander durch den Kontroller mit den beiden anderen Schleifringen *A* und *C*

so verbunden, daß sie in Parallelschaltung zueinander gelangen und schließlich der Läufer kurz geschlossen wird. Diese Schaltung hat außerdem den Vorzug, daß bei richtiger Dimensionierung der Widerstände durchaus keine Vermehrung des Widerstandsmaterials erforderlich ist. Ferner können die Zuleitungen zu den einzelnen Widerständen schwächer dimensioniert werden, da infolge der dauernden Parallelschaltung in ihnen nur Teilströme fließen.

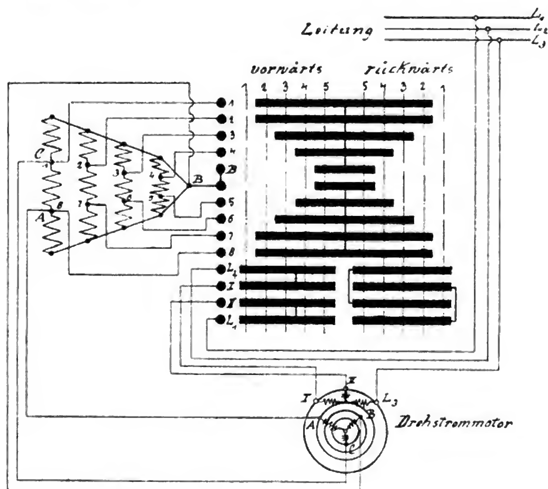


Abb. 14.

In Stellung 1 des Kontrollers (Abb. 14) läuft der Motor langsam an, da nur der Stator an die Leitungen angelegt wird, während in den Stromkreisen des Läufers der größte Widerstand eingeschaltet ist. Auf Stelluug 2 findet eine Parallelschaltung der beiden äußersten Widerstände statt, auf Stellung 5 ist der Läufer kurz geschlossen. Während allerdings die Geschwindigkeit des Drehstrommotors durch Einschalten von

Widerstand in den Rotorstromkreis erniedrigt werden kann, tritt auch gleichzeitig eine Verschlechterung des Wirkungsgrades ein.

Abhülfe nach dieser Richtung hin schafft einigermaßen eine andere Methode der Geschwindigkeitsregulierung, nämlich die sogen. Kaskadenschaltung*) der Wagenmotoren. Man erreicht hierbei bei gleichem Stromverbrauch und halber Geschwindigkeit etwa die doppelte Anzugskraft ohne besondere Verschlechterung des Wirkungsgrades. Bei dieser Schaltung befinden sich im Wagen zwei inbezug auf Polzahl und Umdrehungszahl vollständig gleich gebaute Drehstrommotoren. Jedoch sind nicht beide Motoren an die Zuführungsleitungen angeschlossen, sondern nur der eine, während der Stator des zweiten Motors von dem Rotor des ersteren gespeist wird. Jeder der Motoren liefert bei halber Geschwindigkeit das doppelte Drehmoment, so daß man bei gleicher Stromstärke insgesamt etwa die doppelte Zugkraft erhält. Laufen die Motoren mit voller Geschwindigkeit, so wirken sie als Generatoren und liefern Strom in das Netz zurück.

Um noch einige Geschwindigkeitsstufen mehr zu erhalten, so daß das Anfahren des Wagens möglichst stoßfrei vor sich geht, hat Danielson vorgeschlagen, anstatt zweier Motoren mit gleicher Polzahl, zwei solche auf gemeinsamer Welle sitzende mit ungleicher Polzahl, aber gleicher Leistung zu benutzen. Je nachdem nun der höherpolige oder niedrigpolige Motor an das Netz gelegt wird, kann mit hoher oder niedrigerer Geschwindigkeit gefahren werden. Bei Schaltung der Motoren in Kaskade erhält man durch diese Anordnung einen Motor, dessen Polzahl gleich der Summe der beiden einzelnen Motoren ist. Auf solche Art ergeben sich vier verschiedene Tourenzahlen.

Die Bremsung elektrischer Fahrzeuge.

α) Der Auslaufweg.

Für eine gute Regulierbarkeit der Fahrgeschwindigkeit und besonders für die Sicherheit eines Motorwagens und der Straßenpassanten ist es unbedingt erforderlich, ein elektrisches Fahrzeug mit einer schnell und sicher wirkenden Bremsvorrichtung auszustatten. Während bei den früheren Pferdebahnen, aus denen ja häufig elektrisch betriebene Straßenbahnen hervor-

*) *E. T. Z. 1902, Heft 30.*

gegangen sind, der Bremsung weniger Aufmerksamkeit gewidmet zu werden brauchte, ist dies jetzt, bei Anwendung der höheren Fahrgeschwindigkeiten und bei Benutzung größerer und schwererer Fahrzeuge nicht mehr angängig. Die bei den Pferdebahnwagen benutzte Bremse bestand meistens aus einer verhältnismäßig leichten Spindelbremse, mit deren Hülfe die Wagenräder an je einer Stelle gebremst wurden. Auch bei modernen elektrischen Fahrzeugen leichterer Art (Straßenbahnwagen usw.) ist die Spindelbremse nach gehöriger Verstärkung und Erhöhung der Wirkung durch Benutzung von je zwei Bremsbacken pro Rad in den meisten Fällen beibehalten worden, während bei größeren elektrischen Wagen die hier nicht mehr genügende Handbremsung durch elektrische Bremsung oder solche mittels Druckluft ersetzt wird. Bis zu einem gewissen Grade kann man die Bremswirkung dadurch erhöhen, daß man den Druck der Bremsbacken auf den Radkranz größer macht. Hierbei darf jedoch eine bestimmte Grenze nicht überschritten werden. Bei einer gewissen Größe des Druckes wird der Fall eintreten, daß sich die Räder unter starker Reibung nicht mehr drehen, sondern stehen bleiben und auf den Schienen rutschen. Da nun aber beim Gleiten eines Punktes des Radkranzes auf den Schienen die Reibung zwischen Rad und Schienen kleiner ist, als wenn das Rad unter entsprechend starkem Drucke der Bremsbacken sich gerade noch dreht, so ist der Zustand des Gleitens durch richtige Wahl der Bremskraftgröße zu vermeiden.

Die Vorgänge, die sich bei der Bremsung eines Fahrzeuges abspielen, gleichgültig, ob die Bremsung mechanisch oder elektrisch vor sich geht, sind analog den Vorgängen während der Anfahrt des Wagens.

Zur Bestimmung des Energiebedarfes einer elektrischen Bahnanlage ist es eventuell erforderlich, zu wissen, welchen Weg ein Motorwagen nach erfolgter Anfahrt, d. h. also nach Erreichung einer bestimmten Fahrgeschwindigkeit unter Verbrauch der in ihm aufgespeicherten Energie ohne neue Stromzufuhr zurückzulegen imstande ist.

Der dem Wagen innewohnende Energiebedarf ist $\frac{M v^2}{2}$, wenn durch M die Masse, durch v die Geschwindigkeit in m/sec dargestellt wird.

Dieser Bedarf an lebendiger Energie ist somit durch die Bremsung oder aber, wenn der Wagen ohne künstliche Bremsung auslaufen soll, durch die Reibung zwischen Rädern und Schienen

zu vernichten. Bedeutet Q das Gewicht des Wagens in Tonnen und $g = 9,81$ die Beschleunigung der Schwere in m/sec², so kann man setzen:

$$\frac{M v^2}{2} = \frac{Q \cdot 1000 \cdot v^2}{g \cdot 2} = \frac{Q \cdot 1000 \cdot v^2}{9,81 \cdot 2}.$$

Der Wagen kommt schließlich zum Stehen, weil sich der Bewegung Reibungswiderstände und etwaige Steigungen entgegensetzen. Dieselben werden auch hier berücksichtigt durch den Traktionskoeffizienten f und den Faktor s, der die Steigung $^0/_{00}$ angibt.

Beträgt die Länge des Auslaufweges l m, so ist:

$$\frac{Q \cdot 1000 \cdot v^2}{2 \cdot 9,81} = Q \cdot (f \pm s) \cdot l.$$

Hieraus folgt die Größe des Auslaufweges zu

$$l = \frac{1000\, v^2}{2 \cdot 9,81 \cdot (f \pm s)}\ \text{m}.$$

Von großem Einfluß auf die Länge des Auslaufwegs ist die Steigung. Befindet sich der Wagen auf einem Gefälle und ist $s < f$, so erhält l einen endlichen Wert. Wird $s = f$, so ist der Wert des Nenners in letzter Formel gleich Null, somit wird $l = \infty$, d. h. der Wagen kommt überhaupt nicht zum Stehen, sondern läuft mit gleichmäßiger Geschwindigkeit weiter; die Erdbeschleunigung reicht in diesem Falle gerade aus, die Reibungswiderstände zu überwinden. Ist $s > f$, so wird durch die beschleunigende Schwerkraft die lebendige Kraft des Wagens noch erhöht, so daß die Bremse zur Vernichtung der überflüssigen Energie des Wagens in Tätigkeit treten muß.

β. Die künstliche Bremsung.

1. Die elektrische Bremse. Mit wenigen Ausnahmen werden alle auf Schienen laufende elektrischen Fahrzeuge neben einer Handbremse mit einer wirksamen elektrischen Bremsung versehen. Dieselbe wird in den meisten Fällen dadurch erreicht, daß man den Motor unter Benutzung eines Widerstands als Generator laufen läßt. Der nunmehr von dem Motor gelieferte Strom wird sich im Widerstand in Wärme umsetzen. Der Wagen wird somit, da der Motor sich der lebendigen Energie desselben als Betriebskraft bedient, in kurzer Zeit zum Stillstand kommen.

Halten wir uns bei der Berechnung der erforderlichen Bremswiderstände für Hauptstrommotoren an eine Abhandlung: „Die elektrische Bremsung der Straßenbahnwagen" von M. Müller (*E. T. Z. 1902, Heft 24*), so ist zunächst für die bekannten Stromstärken des Motors dessen jeweilige Bremskraft zu ermitteln.

Bezeichnet man mit J die Stromstärke in Ampère, mit E die elektromotorische Kraft, mit w_a den Ankerwiderstand, mit e die gegenelektromotorische Kraft des Motors, mit Z die tatsächliche Zugkraft in kg, mit V die Geschwindigkeit in km/St, mit Z_t die theoretische Zugkraft in kg, so ist

$$Z = Z_t \cdot \eta,$$

wobei η der Teil des Wirkungsgrades ist, der sich auf die Zugkraft bezieht. Ferner ist

$$e = E - J \cdot w_a.$$

Der Zugkraft Z entspricht die Leistung $J \cdot e$, d. h.

$$\frac{Z \cdot V \cdot 9{,}81}{3{,}6 \cdot \eta} = J \cdot e = J \cdot (E - J w_a).$$

Soll der Motor als Dynamomaschine laufend dieselbe Leistung $J \cdot e$ erzeugen, so ist Z_t um den Verlust $Z_t - Z$ zu erhöhen.

Die Bremskraft beträgt infolgedessen

$$P = Z_t + (Z_t - Z) = 2\,Z_t - Z,$$

setzt man

$$Z_t = \frac{Z}{\eta},$$

so erhält man

$$P = \frac{2\,Z}{\eta} - Z = Z \cdot \frac{2 - \eta}{\eta}.$$

Die Zugkraft Z ist dem Motordiagramm zu entnehmen. der Wirkungsgrad η berechnet sich aus

$$\frac{Z \cdot V \cdot 9{,}81}{3{,}6 \cdot \eta} = J \cdot e$$

zu

$$\eta = \frac{Z \cdot V \cdot 9{,}81}{J \cdot e \cdot 3{,}6} = 2{,}725\,\frac{Z \cdot V}{J \cdot e}.$$

Die Werte für J und V entsprechen den Werten der Zugkraft Z.

Bei der Berechnung der Bremswiderstände hat man ähnlich zu verfahren wie bei der Berechnung der Anfahrtwiderstände

eines Motors. Es soll hierbei eine intensive Bremswirkung durch gleichmäßige Verzögerung erzielt werden. Man muß deshalb die Bremswiderstände so bemessen, daß, richtige Schalterbetätigung vorausgesetzt, die Stromstärke einen gewissen höchsten und niedrigsten Wert nicht überschreitet.

Wählen wir die Motoren, deren Betriebskurven in Abb. 7 gegeben sind, und wird die Höchstgeschwindigkeit, von der aus gebremst werden soll, mit 24 km/St angenommen, so besitzt die maximale Bremsstromstärke den Wert 80 Ampère, die minimale Bremsstromstärke soll 50 Ampère betragen, während beide Motoren parallel geschaltet sind. Der gesamte berechnete Bremswiderstand ist um den Widerstand der Motoren, also um $\frac{1}{2} \cdot 1{,}5 = 0{,}75$ Ohm zu verringern.

Bezeichnet man die gewählte Höchstgeschwindigkeit, von der aus gebremst werden soll, mit v_h (24 km/St), die maximale Stromstärke mit J_n (80 Amp.), die zu dieser Stromstärke gehörige normale Geschwindigkeit mit v_n (16 km/St), die elektromotorische Kraft bei der Geschwindigkeit v_h mit e_h, bei der Geschwindigkeit v_n mit e_n, den Widerstand des Motors mit w, den gesuchten Bremswiderstand mit x, so ist

$$\frac{v_n}{v_h} = \frac{e_n}{e_h}$$

und

$$e_h = J_n \cdot (x + w);$$

hieraus folgt

$$x + w = \frac{v_h \cdot e_n}{v_n \cdot J_n}.$$

Für unser Zahlenbeispiel ergibt sich bei einer Klemmenspannung von 500 Volt

$$x + w = \frac{24 \cdot 440}{16 \cdot 80} = 8{,}2 \text{ Ohm}.$$

Der Punkt C (Abb. 15) ist somit durch den Schnittpunkt der Linie 1 G und der Senkrechten in F (8,2 Ohm) bestimmt.

Punkt D erhält man unter der Annahme, daß $J_n = 50$ Amp. ist. Die Widerstandsgeraden OD und OC sind somit gegeben. Der Linienzug C, I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII liefert die verschiedenen fünf Bremswiderstände von 8,2, 5,7, 3,9, 2,7 und 1,8 Ohm inkl. des Motorwiderstandes.

Die Zickzacklinie 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 0 zeigt den Verlauf der Stromstärke. Ebenso wie der Vorgang der Beschleunigung in Abhängigkeit vom Wege sich graphisch darstellen läßt (Abb. 10), kann auch der Vorgang während der Bremsung ähnlich behandelt werden.

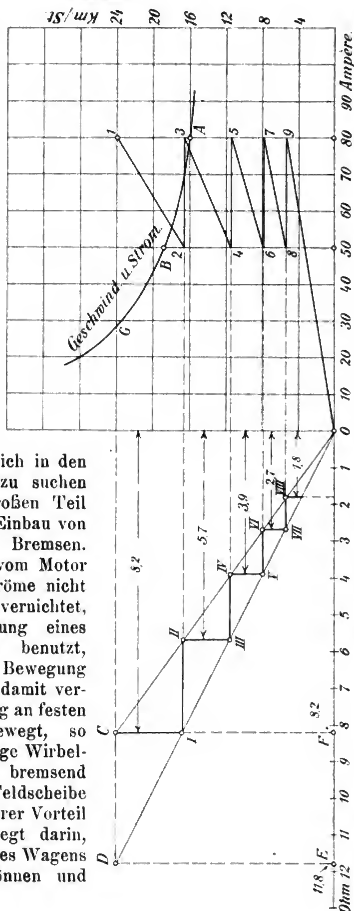


Abb. 15.

2. Die magnetische Bremse. Die nachteiligen Erscheinungen, die bei Anwendung der Kurzschlußbremse auftreten und hauptsächlich in den hohen Stromstärken zu suchen sind, werden zum großen Teil vermieden durch den Einbau von elektromagnetischen Bremsen. Hierbei werden die vom Motor erzeugten starken Ströme nicht direkt in Widerständen vernichtet, sondern zur Erzeugung eines magnetischen Feldes benutzt, das sich durch die Bewegung des Wagens und die damit verbundene Achsendrehung an festen Eisenmassen vorbeibewegt, so daß in letzteren kräftige Wirbelströme auftreten und bremsend auf die rotierende Feldscheibe einwirken. Ein weiterer Vorteil derartiger Bremsen liegt darin, daß mehrere Achsen des Wagens gebremst werden können und

dadurch das Adhäsionsgewicht des Wagens besser ausgenutzt wird. Eine äußerst günstige Bremswirkung wird durch die sogenannten Schienenbremsen erzielt. Die Wirkungsweise dieser Bremsen besteht darin, daß ein über den Schienen aufgehängter hufeisenförmiger Magnet durch den vom Motor gelieferten Strom erregt wird und dadurch ein durch die Schienen geschlossenes kräftiges magnetisches Feld erzeugt. Infolgedessen wird der Magnet mit starkem Druck auf die Schienen aufgepreßt. Gleichzeitig werden durch diese Bewegung des Magneten die mit ihm verbundenen Bremsbacken der Räder an dieselben angelegt und helfen somit wesentlich die Bremskraft verstärken. Die Schienenbremsung besitzt ebenfalls den Vorteil der Unabhängigkeit vom Adhäsionsgewicht des Wagens.

Wird mit Anhängewagen gefahren, so können diese auch mit Hülfe der Solenoidbremse elektrisch gebremst werden. Dieselbe besteht aus einer Spule, in welcher ein eiserner Kern kräftig bei Stromdurchgang durch die Windungen des Solenoides hineingezogen wird. Dadurch werden die Bremsbacken angezogen. Der Strom wird ebenfalls in den meisten Fällen von dem als Dynamo laufenden Motor geliefert.

3. Die Luftdruckbremse. Um die Wirkung der Bremse vollkommen unabhängig von den übrigen Teilen des Fahrzeuges zu machen, hat man auch bei Straßenbahnen mit Erfolg Druckluft als Bremskraft verwendet. Durch eine von der Wagenachse angetriebene Pumpe (Kompressor) wird die Druckluft in einen Behälter gepreßt und wirkt von hier aus je nach Bedarf mehr oder weniger stark auf den Querschnitt eines Bremskolbens, der mit dem Bremsgestänge verbunden ist. Die Bremse wirkt stoßfrei und geräuschlos und stellt bei vorheriger Druckregelung die Räder nicht fest. Die Luftdruckbremse besitzt ferner den Vorteil, daß sie unabhängig von der Geschwindigkeit des Wagens gleichmäßig arbeitet, so daß der Wagen vollständig zum Stehen gebracht wird. Infolge der momentanen Druckverteilung werden etwaige Anhängewagen bei Betätigung der Bremse sofort abgebremst, so daß ein Auflaufen auf die anderen Wagen nicht eintreten kann. Mit Hülfe eines am Führerstand angebrachten Manometers kann sich der Wagenführer jederzeit von dem Zustande der Bremse überzeugen, so daß ein Versagen der Bremse so gut wie ausgeschlossen ist.

III. Abschnitt.

Berechnung des Energiebedarfes einer elektrisch betriebenen Schienenbahn.

Der maximale Energiebedarf. Die Berechnung des maximalen Energiebedarfes einer Bahnstrecke setzt den Fahrplan und den Höhenplan der betreffenden Strecke voraus. Der Fahrplan einer Strecke von 4 km Länge ist in Abb. 16 graphisch

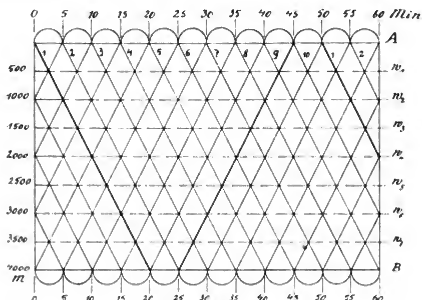


Abb. 16.

dargestellt. Die Zeiten sind auf einer horizontalen Linie, die Streckenlängen auf einer vertikalen Linie aufgetragen. Beträgt die Geschwindigkeit, mit der auf dieser Strecke gefahren wird, durchschnittlich 12 km/St, so wird die gesamte Strecke AB in 20 Minuten durchfahren. Fährt also der Wagen 1 zur Zeit 0 von A ab, so ist er nach 20 Minuten in B angekommen. Die Wagen sollen sich in Zwischenräumen von 5 zu 5 Minuten folgen. Setzt man ferner voraus, daß die Wagen auf den Endstationen A und B je 5 Minuten Aufenthalt haben sollen, so würde der Wagen 1 nach 45 Minuten, von seiner Abfahrt an gerechnet, in A wieder ankommen. Zur Zeit 50 kann somit

der Wagen 1 seine Fahrt nach *B* wieder beginnen. Es sind infolgedessen 10 Wagen zum Betriebe auf der Strecke nötig.

Die Aufenthalte auf den Zwischenstationen sind bei Annahme einer Fahrgeschwindigkeit von 12 km/St bereits mit eingerechnet, so daß sich der Weg eines Wagens als gerade Linie darstellt. Würde sich die Geschwindigkeit innerhalb der Strecke *AB* auf ein bestimmtes Stück Weg ändern, so würde dies im Fahrplane natürlich dadurch zum Ausdruck kommen, daß der Weg des Wagens nicht eine gerade, sondern eine gebrochene Linie bildet.

Die Längen der Aufenthalte an den Endstationen sind sorgfältig zu bestimmen, da einerseits die Wagenführer (wenn es sich z. B. um eine Straßenbahn handelt) genügend Zeit zur Verfügung haben müssen, den Wagen zur Rückfahrt bereit zu machen, andererseits aber auch durch Kürzung dieser Aufenthalte die Wagenzahl eventuell verringert werden kann.

Aus dem graphischen Fahrplane geht ohne weiteres hervor, an welchen Stellen der Linie sich zwei Wagen begegnen. Diese Stellen werden durch die Schnittpunkte der Wagenwege gekennzeichnet und liegen bei w_1, w_2, w_3, ... An diesen Stellen müßten also bei eingleisigen Bahnen Ausweichen eingebaut werden.

Ein Beispiel des Höhenplanes einer Bahn ist in Tafel I gegeben. Der Maßstab der Höhen ist, wie allgemein üblich, ein anderer wie der der Längen. Die gesamte Länge der Strecke *AB* beträgt 3,8 km. Die Steigungsverhältnisse sind aus dem Plane ersichtlich. Zur besseren Orientierung ist die ganze Strecke in einzelne Hauptabschnitte von je 100 m Länge eingeteilt, d. h. „hektometriert". Diese Hektometerzahlen 0,00, 0,50, 1,00, 1,50 usw. sind im Plane eingetragen.

Gleichzeitig ist unterhalb des Höhenplanes das sogenannte Kurvenband aufgezeichnet, das Aufschluß gibt, wo sich Bahnkrümmungen auf der Strecke befinden und wie groß deren Radien und Bogenlängen sind. Die Kenntnis der Lage stärkerer Bahnkrümmungen ist, wie früher bemerkt, deshalb wichtig, weil durch eventuell erneutes Anfahren an derartigen Stellen der gesamte Kraftbedarf der Strecke erheblich vergrößert wird.

Nimmt man an, daß die Wagen auf der Strecke in Intervallen von 5 zu 5 Minuten verkehren, daß ferner die maximale Fahrgeschwindigkeit 24 km/St, d. i. 6,7 m/sec, beträgt und daß die im Abschnitt II bereits verwendeten Motoren Anwendung finden, so können die im Abschnitt II ermittelten Werte der

Regulier- und Bremswiderstände und die daselbst entwickelten Kurven während der Anfahrt eines Wagens direkt auf dieses Beispiel übertragen werden.

Aehnlich wie man in Abb. 10 die Geschwindigkeit während der Anfahrt in Abhängigkeit vom zurückgelegten Wege graphisch dargestellt hat, tut man dies jetzt nicht nur für die Anfahrt, sondern für die ganze Streckenlänge *A B*. Man erhält auf diese Weise die Kurven der Geschwindigkeiten für die Fahrt von *A* nach *B* und von *B* nach *A* (Tafel I). Betrachtet man die Kurve der Geschwindigkeit für die Fahrt von *A* nach *B*, so erkennt man, daß, in *a* beginnend, die Geschwindigkeit bei Abfahrt des Wagens von Null auf den maximalen Wert von 6,7 m/sec ansteigt. Hierzu ist, wie in Abb. 10 entwickelt, ein Weg von 145 m erforderlich. Da die Strecke von *a* bis *b* keine Steigung aufweist, läuft der Wagen die nächsten 55 m mit gleichmäßiger Geschwindigkeit von 6,7 m/sec. Hierauf hat der Wagen von *b* bis *c* die Steigung von 40 $^0/_{00}$ zu überwinden. Die Geschwindigkeit wird infolgedessen bis auf einen Wert von etwa 4 m/sec sinken. Zur Bestimmung dieser Geschwindigkeit und ebenso der Stromstärke, die auf der Steigung von 40 $^0/_{00}$ erforderlich ist, kann man sich des in Abschnitt I durch Abb. 2 erläuterten Verfahrens bedienen. Von *c* bis *d* beträgt die Steigung nur noch 17 $^0/_{00}$; infolgedessen kann der Wagen, unter Aufnahme einer höheren Stromstärke als den normalen Terrainverhältnissen entspricht, allmählich auf die Geschwindigkeit von 6,7 m/sec gebracht werden. Sobald sich der Wagen nunmehr der ersten Haltestelle bis auf etwa 50 m genähert hat, schaltet der Wagenführer den Strom ab, und das Fahrzeug läuft unter allmählicher Verringerung der Geschwindigkeit infolge seiner lebendigen Energie bis zur Haltestelle stromlos, wo eventuell noch die Bremse in Tätigkeit zu treten hat.

An Haltestelle *e* beginnt nunmehr der Wagen sich wiederum in Bewegung zu setzen, wobei sich, da *e* auch auf horizontaler Bahn liegt, dieselben Vorgänge abspielen wie bei Anfahrt von Haltestelle *a*. Aehnlich wie auf der Wegstrecke von *a—e* bestimmt sich die Geschwindigkeitskurve auf der Strecke *e—h*, *h—k*, *k—m* und *m—p*. In *k* wird selbstverständlich die maximale Fahrgeschwindigkeit früher erreicht als in *a*, *e* und *h*, da die Haltestelle *k* auf einer Neigung von 33 $^0/_{00}$ liegt.

Die Geschwindigkeitskurve für die Fahrt von *B* nach *A*, die ebenfalls in Tafel I gezeichnet ist, bestimmt sich an Hand gleicher Ueberlegungen.

Wesentlich für die Berechnung des Energiebedarfes der Strecke ist die Kenntnis des Stromverbrauches des Wagens in jedem Augenblick. Für eine bestimmte Geschwindigkeit, einen bestimmten Traktionskoeffizienten und Wirkungsgrad der Motoren läßt sich nach Seite 8 für die verschiedenen Steigungen bei einer Klemmanspannung von K Volt die Stromstärke berechnen zu

$$J = \frac{Q \cdot (f \pm s) \cdot V \cdot 736}{75 \cdot 3{,}6 \cdot \eta \cdot K} \text{ Ampère.}$$

Mit Hülfe dieser Formel kann die jeweilige Stromstärke graphisch in Abhängigkeit vom Wege gebracht werden, wie dies auf Tafel I durchgeführt ist. Selbstverständlich erhält man für Hin- und Rückfahrt zwei verschieden gestaltete Stromkurven.

Stehen die Wagen auf horizontaler Bahn, so beträgt, wie früher gezeigt, die Anfahrtsstromstärke der verwendeten Motoren 71 Ampère. Während der Anfahrt sinkt sodann die Stromstärke bis auf den Wert von 28 Ampère, der nötig ist, den Wagen gleichmäßig schnell auf ebener Bahn vorwärts zu bewegen. Der soeben geschilderte Vorgang würde sich abspielen auf dem Stücke a—b der Strecke AB. Da in b eine größere Steigung einsetzt, muß die Stromstärke bis auf 80 bis 90 Ampère steigen, um dann auf der geringeren Steigung von c nach d wieder auf den normalen Wert herabzusinken. In Punkt d, also 50 m vor der Haltestelle beginnt der Wagen auszulaufen; der Wagenführer schaltet den Strom ab, so daß auf der Strecke d—e kein Strom verbraucht wird. In gleicher Weise entwirft man die Stromkurve für den übrigen Teil der Bahnstrecke.

Die Werte der Stromstärken zu den verschiedenen Zeiten können bei Bahnen mit viel Haltestellen noch eine Erhöhung erfahren, da während des Anfahrens, Auslaufens und Haltens des Wagens eine gewisse Zeit vergeht, die bei Bestimmung der fahrplanmäßigen Geschwindigkeit häufig nicht mit berücksichtigt zu werden pflegt. Infolgedessen muß der Wagen außerhalb der Haltestellen mit größerer Geschwindigkeit als der Fahrplan angibt, fahren. Dieses Schnellerfahren bedingt aber auch einen größeren Aufwand an Strom.

Um nun mit Hülfe des Höhenplanes und der Stromkurven den maximalen Energiebedarf der Bahn festzustellen, bedarf man noch des Fahrplanes, der auf Tafel I ebenfalls aufgezeichnet ist. Es ist 5-Minutenbetrieb angenommen mit einem Aufenthalt

von 5 Minuten auf jeder Endstation. Denkt man sich im Fahrplan eine horizontale Linie *I II* gezogen, so wird durch diese Gerade ein Zeitmoment bestimmt. Es ist ersichtlich, daß in diesem durch die Linie *I II* festgelegten Augenblick sich 4 Wagen auf der Linie befinden und Strom verbrauchen, während 2 Wagen auf den Haltestellen stehen. Die Wagen stehen an den Punkten s, s_1, s_2, s_3. Der Stromverbrauch dieser 4 Wagen ist aus den Stromdiagrammen zu entnehmen und bestimmt sich:

für s zu $i_1 = 40$ Ampère,
„ s_1 „ $i_2 = 71$ „
„ s_2 „ $i_3 = 44$ „
„ s_3 „ $i_4 = 28$ „

im ganzen also $J = 183$ Ampère.

Denkt man sich jetzt eine zweite Linie *I' II'* zu einem anderen Zeitmoment gezogen, so stehen ebenfalls wieder 4 Wagen an den Stellen s', s'_1, s'_2, s'_3. In diesem Falle beträgt der Normalverbrauch:

für s' $i''_1 = 71$ Ampère.
„ s'_1 $i''_2 = 54$ „
„ s'_2 $i''_3 = 44$ „
„ s'_3 $i''_4 = 71$ „

im ganzen also $= 240$ Ampère.

Im zweiten Falle ist somit der Stromverbrauch um etwa 60 Ampère höher als im ersten Fall. Der Verbrauch von $J = 240$ Amp. würde daher zur Bestimmung des maximalen Energiebedarfes maßgebend sein, vorausgesetzt, daß sich nicht noch eine dritte Stelle im Fahrplane ermitteln läßt, an der die Wagen einen noch höheren Stromkonsum aufweisen. Beträgt die Spannung an den Klemmen des Motors 500 Volt, so besitzt die den Wagen zuzuführende Energie die Größe

$$L = 500 \cdot 240 = 120 \text{ KW.} = \sim 163 \text{ PS.}$$

Der mittlere Energiebedarf. Um den mittleren Arbeitsbedarf pro Sekunde für eine elektrische Bahnanlage (Straßenbahn) festzustellen, der z. B. in Frage kommt bei der Anwendung von Bufferbatterien, kann man nach *Schröder, E. T. Z. 1899* die Arbeit ausrechnen, die nötig ist, um einen Wagen einmal über die ganze Strecke hin- und einmal über die ganze Strecke zurückzuführen. Diese gefundene Arbeit hat man durch die Zeit in Sekunden zu dividieren, in welcher ein Wagen auf den andern in derselben Richtung folgt.

Bei der Berechnung der Arbeit kann noch die Vereinfachung gemacht werden, daß alle Steigungen unter 12 ‰ vernachlässigt, d. h. als horizontale Strecken angesehen werden.

Bezeichnet l den vom Wagen zurückgelegten Weg, A die Arbeit, so ist

$$A = Z \cdot l = (P + Q) \cdot (f \pm s) \cdot l \text{ mkg.}$$

Der Mehrverbrauch an Arbeit bei der Anfahrt wird, wie bereits im Abschnitt I erwähnt, dadurch berücksichtigt, daß man den Traktionskoeffizienten f um 25 % erhöht.

Somit beträgt die pro Wagen erforderliche Arbeit

$$A = \frac{(P + Q) \cdot (1{,}25\, f \pm s) \cdot l}{\eta} \text{ mkg.}$$

Für Steigungen unter 12 ‰ wird

$$A = \frac{(P + Q) \cdot 30 \cdot l}{\eta} \text{ mkg.}$$

Für Steigungen über 12 ‰ wird

$$A = \frac{(P + Q) \cdot (18 + s) \cdot l}{\eta} \text{ mkg.}$$

Beispiel: Es betrage die Länge einer Strecke wieder 3,8 km, hiervon sind horizontal und Steigungen bis zu 12 ‰ 1,8 km,
Steigungen über 12 ‰ 2,0 km,
das Gewicht des besetzten Wagens mit Anhängewagen
$(P + Q) = 17$ t,
die Größe des Traktionskoeffizienten $f = 12$ kg/t,
der Zuschlag zum Traktionskoeffizienten für Anfahrten: 25 %,
Güteverhältnis der Motoren und Uebersetzungen $\eta = 0{,}7$,
Wagenfolge: 5 Minuten.

Man erhält für Steigungen bis zu 12 ‰:

$$A = \frac{(P + Q) \cdot 30 \cdot l}{\eta} = \frac{17 \cdot 30 \cdot 1800}{0{,}7} = 611\,430 \text{ mkg,}$$

für eine Steigung von 40 ‰ auf einer Länge von 300 m:

$$A = \frac{(P + Q) \cdot (18 + s) \cdot l}{\eta} = \frac{17 \cdot (18 + 40) \cdot 300}{0{,}7} = 422\,570 \text{ mkg,}$$

für eine Steigung von 17 ‰ auf einer Länge von 300 m:

$$A = \frac{17 \cdot 35 \cdot 300}{0{,}7} = 255\,000 \text{ mkg,}$$

für eine Steigung von 33 $^0/_{00}$ auf einer Länge von 1100 m:

$$A = \frac{17 \cdot 51 \cdot 1100}{0,7} = 1\,362\,430 \text{ mkg},$$

für eine Steigung von 30 $^0/_{00}$ auf einer Länge von 300 m:

$$A = \frac{17 \cdot 48 \cdot 300}{0,7} = 349\,714 \text{ mkg};$$

im ganzen beträgt somit der Arbeitsverbrauch 3 001 144 mkg.

Diese Zahl ist durch die Anzahl der Sekunden zu dividieren, in welcher ein Wagen auf den anderen folgt, also durch $5 \cdot 60 = 300$, um den mittleren Effekt zu erhalten. Dies gibt:

$$L = \frac{3001144}{300} = 10000 \text{ mkg} = 133 \text{ PS}.$$

Sieber gibt für den Energieverbrauch pro Kilometer eines Motorwagens folgende Werte (*E. T. Z. 1900*):

Anzahl der Haltestellen pro km	Energieverbrauch pro km eines zweimotorigen Wagens in KW.	Energieverbrauch pro km eines einmotorigen Wagens in KW.
1	5,2	4,3
2	5,7	5,3
3	6,2	6,7
4	6,8	7,3
5	7,3	8,3

Für die in Tafel I dargestellte Strecke wird somit der Energieverbrauch berechnet zu:

$$7,3 \cdot 4 \cdot 3,8 = 111 \text{ KW.} = 150 \text{ PS}.$$

Dieser Wert stimmt annähernd mit dem anfänglich berechneten überein.

IV. Abschnitt.

Die Leitungsberechnungen elektrischer Bahnen.

Die Oberleitung der Strassen- und Kleinbahnen. Bei Straßenbahnanlagen größerer Ausdehnung kann die Berechnung des Leitungsnetzes in ähnlicher Weise durchgeführt werden wie die Berechnung eines Netzes für Beleuchtungszwecke. Ein Bahnnetz weist insofern eine geringe Vereinfachung in seiner Berechnung gegenüber einer Beleuchtungsanlage auf, als man von vornherein an einen ganz bestimmten Leitungsquerschnitt, gewöhnlich 50 mm^2, gebunden ist. Andererseits entstehen aber auch bedeutende Schwierigkeiten bei Durchführung einer exakten Berechnung der Strom- und Spannungsverhältnisse dadurch, daß die Belastungspunkte nicht örtlich fest liegen, sondern sich dauernd verschieben. Gleichzeitig ändert sich wesentlich die Stärke der Belastung je nach der Besetzung der Wagen und den Terrainverhältnissen. Ferner ist es bei einer Bahnanlage niemals ausgeschlossen, daß infolge einer Betriebsstörung oder infolge irgend einer anderen Veranlassung an bestimmten Stellen der Linie, z. B. an den Endstationen, Anhäufungen von Motorwagen stattfinden. Infolgedessen werden die Leitungen zur Zeit des Anfahrens dieser Wagen außerordentlich stark beansprucht, wodurch ein bedeutender Spannungsverlust in der Leitung auftritt. Die Folge hiervon ist ein schlechtes Anfahren der Wagen, da die Motoren eine zu geringe Spannung erhalten, und ein ungenügendes Brennen der Wagenlampen. Weitere Ungenauigkeiten in der Stromverteilung können sich dadurch einstellen, daß seitens der Wagenführer die Steuerapparate ungeschickt bedient werden, so daß unter Umständen die auftretenden Stromstärken höher sind als die berechneten. Zur Rückleitung des Stromes werden die Schienen benutzt, die allerdings in vielen Fällen durch besondere Rückleitungskabel unterstützt werden.

Ausgedehntere Straßenbahnanlagen sind meistens mit sog. Streckenausschaltern ausgerüstet, die an bestimmten Stellen die Oberleitung unterbrechen können. Es ist somit möglich, einzelne Teile des gesamten Netzes stromlos zu machen, ohne

daß der gesamte Betrieb aussetzen muß. Tritt eine solche Unterbrechung des Stromes an irgend einer Stelle ein, so wird sich in vielen Fällen die Stromverteilung im übrigen Bahnnetze vollkommen verschieben und von einer Berechnung, die für normalen Betrieb durchgeführt wurde, wesentlich abweichen. Es kann auf solche Weise geschehen, daß Speiseleitungen um das Doppelte ihrer normalen Belastung auf längere Zeit beansprucht werden.

Man erkennt also, daß von einer exakten Berechnung, wie dies bei Beleuchtungsnetzen möglich ist, kaum die Rede sein kann. Aus diesen Gründen begnügt man sich auch meistens damit, die Leitungen (und zwar werden die Speiseleitungen hauptsächlich in Frage kommen) für eine normale mittlere Belastung zu berechnen. Bei der Berechnung der Speiseleitungen elektrischer Straßenbahnen wird gewöhnlich ein Spannungsabfall von 10 % zugrunde gelegt. Beträgt die Klemmenspannung der Motoren 500 Volt, so besitzt also der gesamte Spannungsverlust den Wert von 50 Volt.

Bedeutet z. B. in Abb. 17 S einen Speisepunkt oder die Zentrale, und laufen auf der Strecke $S-B$ Wagen in Zwischenräumen von fünf Minuten, so befinden sich dieselben in Abständen von 1250 m voneinander, wenn die Fahrgeschwindigkeit zu 12 km/St. angenommen ist. Beträgt der normale Stromverbrauch pro Wagen 20 Ampère, so berechnet sich der Spannungsabfall in der Oberleitung zu

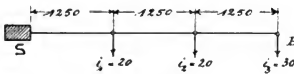


Abb. 17.

$$\varepsilon = \frac{\Sigma\, i \cdot l}{\rho \cdot q} = \frac{20 \cdot (1250 + 2500 + 3750)}{60 \cdot 50} = 50 \text{ Volt.}$$

Hierin bedeutet i die Stromstärke, l die zugehörige Entfernung vom Speisepunkt, $\rho = 60$ das Leitungvermögen des Kupfers, q den Querschnitt $= 50$ mm². Würde allerdings eine Verschiebung der Belastung in der Weise erfolgen, daß aus irgend einem Anlaß, am Ende der Strecke drei Wagen fast gleichzeitig abfahren, so wäre der Spannungsverlust

$$\varepsilon = \frac{3750 \cdot 60}{60 \cdot 50} = 75 \text{ Volt,}$$

also bedeutend höher als bei normaler Belastung.

Nimmt man an, daß bei der in Tafel I dargestellten Bahnstrecke die Zentrale im Punkte A liegt, so beträgt für den Fall des maximalen Energiebedarfes in normalem Betriebe der Spannungsverlust im Punkte S_3'

$$\varepsilon = \frac{71 \cdot 920 + 54 \cdot 1330 + 44 \cdot 2420 + 71 \cdot 2830}{60 \cdot 50} = 148 \text{ Volt.}$$

Der Spannungsverlust ist somit viel zu hoch. Man könnte sich dadurch helfen, daß man zwei Leitungsdrähte für Hin- und Rückleitung spannt. Trotzdem würde der Spannungsverlust noch $\frac{148}{2} = 74$ Volt betragen. Es ist deshalb bei dieser Strecke unbedingt nötig, einen Speisepunkt in der Nähe von B, der Endstation, anzuordnen, wodurch sich selbstverständlich die Spannungsverhältnisse für vorstehende Linie äußerst günstig gestalten. Bei der Bestimmung des Ortes des Speisepunktes ist in Erwägung zu ziehen, ob die Linie später event. noch über B hinaus verlängert werden kann, da bei einer solchen Möglichkeit der Speisepunkt nahe B zu verlegen ist, um später die erweiterte Strecke ebenfalls bequem mit Strom versorgen zu können. Dieselbe Frage hat man sich bei Berechnung des Querschnittes der Speiseleitung selbst zu stellen.

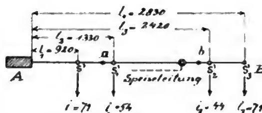


Abb. 18.

Wie schon oben erwähnt, wird zwecks Betriebssicherheit ein ausgedehnteres Bahnnetz mit Streckenausschaltern versehen, um einzelne Teile vom gesamten Netz lostrennen zu können. Man würde auch bei vorstehendem Beispiel (Tafel I) eine solche Unterteilung vielleicht in den Punkten a und b (Abb. 18) vornehmen, so daß die Streckenteile a—b und b—B oder auch b—B für sich allein betrieben werden könnten. Eine solche Unterteilung wäre bei Nichtvorhandensein des Speisepunktes unweit B von geringerem Werte. Auch bei dieser Strecke könnten, wie dies überhaupt häufig bei längeren Bahnlinien geschieht, zwei Fahrdrähte angebracht werden.

Auch bei Bahnnetzen größeren Umfanges kann bei Berechnung der Spannungsverluste in der Oberleitung in derselben Weise verfahren werden, wie es bei der Bahnlinie auf Tafel I geschehen ist. Mit Hülfe der Fahrpläne der Linien werden für jede einzelne Linie die ungünstigsten Wagenstellungen bestimmt

und die Belastungsströme in den maßstäblich gezeichneten Lageplan eingetragen. Bestände z. B. nach Abb. 19 die gesamte Bahnanlage aus einer Ringlinie *I* und einer diese durchkreuzende Pendellinie *II*, wären ferner die Ströme *i* der Wagen in einem möglichst ungünstigen Augenblick an den richtigen Stellen des Netzes eingetragen, so könnte unter mehrmaliger Benutzung der Schnittmethode Ort und Größe des maximalen Spannungsverlustes bestimmt werden. Da an Hand der Fahrpläne eine Wagenstellung gewählt wurde, die einen augenblicklichen maximalen Strombedarf bedingt, so ist anzunehmen, daß bei jeder anderen Stellung der Wagen zueinander unter normalen Verhältnissen kein größerer Spannungsverlust als berechnet auftreten wird. Die Größe des Spannungsverlustes wird zeigen, ob es nötig ist, z. B. bei *a* oder *b* oder an beiden Stellen das Netz mit Speisepunkten zu versehen.

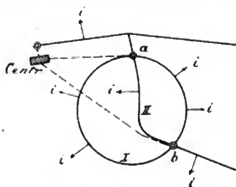


Abb. 19.

In Abb. 20 ist die Gesamtanlage einer bestehenden elektrischen Straßenbahn wiedergegeben. Die einzelnen Bahnlinien sind infolge der verschiedenen Strichstärken in der Zeichnung leicht zu erkennen. Die Streckenausschalter sind durch das Zeichen ⫯ kenntlich gemacht; *S* bedeuten Speisepunkte, die von der Zentrale aus durch unterirdisch verlegte Kabel den Strom zugeführt erhalten. Der Querschnitt der einfachen Oberleitung beträgt 50 mm², der der Kabel fast allgemein 120 mm². Die Betriebsspannung an den Klemmen der Motoren ist 500 Volt.

Durch das Zeichen ‖ ist angedeutet, daß an diesen Stellen die Fahrdrähte durch ein kurzes Kabelstück miteinander verbunden sind. Man will damit einen besseren Stromausgleich in den weit entfernten Teilen des Netzes erreichen.

Die Längen sind in Abb. 20 nur für die Linie I eingeschrieben. Alle anderen nötigen Maße lassen sich mit Hülfe des beigegebenen Maßstabes leicht bestimmen.

Die wichtigsten Zahlen dieser Anlage sind in nebenstehender Tabelle niedergelegt.

Die Rückleitung der Strassen- und Kleinbahnen. Zur Rückleitung des Stromes werden bei den Straßenbahnen, Klein- und Industriebahnen fast ausschließlich die Schienen be-

Linie	Länge der Linie in m	Zeitliche Wagenfolge in Min.	Fahrgeschwindigkeit in km/Std.	Max. Steigung	Normal. Stromverbr. pro Wagen	Anzahl der Haltestellen	Anzahl der Fahrdrähte
I	11900	5	15	1:30 auf 200 m	25 Amp.	30	2
II	9500	5	15	1:400 auf 300 m	25 Amp.	22	2
III	7000	5	15	1:17 auf 200 m	25 Amp.	19	2
IV	4500	10	12	1:500	25 Amp.	14	2
V	5800	10	12	1:15 auf 250 m	25 Amp.	19	2
VI	4200	7	12	1:35 auf 100 m	25 Amp.	11	2

nutzt. Nur bei wenigen Bahnsystemen, z. B. bei Bahnen mit unterirdischer Stromzuführung und gleislosen Bahnen wird das Doppelfahrdrahtsystem in Anwendung gebracht. Auf die Verlegung der Schienen und besonders auf eine möglichst gute elektrische Verbindung derselben untereinander ist deshalb die größte Sorgfalt zu verwenden. Der Spannungsabfall in den Schienen ist meist viel kleiner als derjenige in den Stromzuführungsdrähten, da diese im Vergleich mit den Schienen einen wesentlich höheren Widerstand besitzen. Nimmt man den spezifischen Leitungswiderstand des Kupfers zu 0,0174, den des Stahles zu 0,108 an, so würde die Leitungsfähigkeit des Stahles $^1/_6$ der des Kupfers betragen. Bedenkt man nun, daß 1 dm³ Stahl ein Gewicht von 7,75 kg aufweisen kann, so entspricht 1 kg Stahl einem Volumen von $\frac{1}{7{,}75} = 0{,}129$ dm³. Wird 1 kg Stahl zu einer Schiene von 1,00 m Länge ausgewalzt, so wird deren Querschnitt $q = \frac{0{,}129}{10} = 0{,}0129$ dm² $= 129$ mm².

Bezeichnet man mit w den Ohmschen Widerstand und mit l die Länge einer solchen Schiene, so ist bekanntlich

$$w = c \cdot \frac{l}{q} = \frac{0{,}108 \cdot 1}{129} = 0{,}000837 \text{ Ohm.}$$

Nun wiegt 1 m der Schiene aber nicht nur 1 kg, sondern etwa 40 kg, so daß der Widerstand den Wert erhält

$$w = \frac{0{,}000837}{40} = 0{,}000021 \text{ Ohm.}$$

Abb. 20.

Für 1 kg Schiene beträgt somit der Widerstand

$$w = 0{,}000021 \cdot 1000 = 0{,}021 \text{ Ohm}$$

oder, da stets beide Schienen zur Stromzuführung benutzt werden,

$$w = \frac{0{,}021}{2} = 0{,}011 \text{ Ohm}.$$

Der Spannungsabfall pro Kilometer Gleis kann sodann bestimmt werden nach $\varepsilon = i \cdot w$, wenn ε den Spannungsabfall und i die Stromstärke bedeuten.

Der Widerstand der kupfernen Oberleitung von 1 km Länge würde dagegen etwa 0,348 Ohm betragen, also wesentlich höher sein als der Widerstand einer gleichlangen Gleisstrecke. Die Schienen würden etwa 30 mal so gut den Strom leiten als die Oberleitung.

In der praktischen Ausführung gestalten sich allerdings diese Verhältnisse dadurch wesentlich ungünstiger, als die elektrischen Verbindungen der Schienen in den meisten Fällen nicht vollkommen sein können, so daß zu dem eigentlichen Schienenwiderstand, der sich auf vorstehende Weise bei Kenntnis der Leitungsfähigkeit des zur Verwendung kommenden Stahles leicht bestimmen läßt, noch ein gewisser Uebergangswiderstand als Summand der vielen einzelnen kleinen Uebergangswiderstände an den Schienenverbindungsstellen hinzutritt. Diese Uebergangswiderstände sind unter Umständen ganz erheblich, so daß ihr Wert den der Schienen übersteigen kann. Es ist deshalb bei der Verlegung der Schienen die denkbar größte Sorgfalt auf den guten Einbau der Schienenverbindungen zu verwenden. Daß hierbei die Konstruktion der Schienenverbindung selbst eine wesentliche Rolle spielt, ist selbstverständlich.

Es gibt heutzutage eine große Anzahl von Schienenverbindern verschiedenster Konstruktion. Eine einfache aber gebräuchliche Form einer Schienenverbindung zeigt Abb. 21. Dieselbe besteht aus einem Kupferbügel von 8 bis 10 mm Durchmesser, der beiderseits in Eisenköpfe eingenietet ist. Diese Köpfe besitzen konische Ansätze, um die Verbindung in den Schienen festnieten zu können. Zum Schutze gegen Nässe ist die Verbindung gut

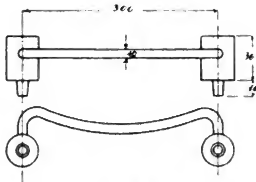


Abb. 21.

verzinnt. Zum Einsetzen der Verbindungen in die Schienenstege sind an den Laschen der Schienen besondere Oeffnungen vorgesehen, die sich genau mit den Löchern in den Schienenstegen decken müssen, um ein schiefes Einsetzen der Verbindung auszuschließen. Die konischen Ansätze der Eisenköpfe werden in diese Löcher eingesetzt, nachdem letztere mittels einer Reibahle gut blank gerieben worden sind, und mit Hülfe eines kleinen Handhammers festgeschlagen. Die Verbindung muß natürlich ohne zu wackeln im Schienensteg festsitzen. Um den konischen Stift noch inniger mit der Schiene in Verbindung zu bringen, wird derselbe vernietet.

Zwei Schienenverbindungen anderer Konstruktion zeigen die Abb. 22 und 23. Die Ansätze *a* der Verbindung Abb. 22



Abb. 22.

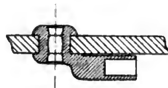


Abb. 23.

werden in die Löcher im Schienensteg eingesetzt und durch eingetriebene Keile mit dem Stege verbunden. Die in Abb. 23 dargestellte Verbindung besteht aus einem blanken Kupferseil, das durch besondere kupferne Kontaktstücke an den Schienenstegen befestigt ist. In die Hülse des Kontaktstückes wird ein Eisenstift eingesteckt, der durch eine Schraubenpresse unter hohem Druck zusammengepreßt wird. Dadurch wird der Eisenstift gestaucht und die Kupferhülse gegen die Wandung und um den Rand der Schienenlöcher gepreßt, wodurch eine gute, metallische Verbindung zwischen Kontaktstück und Schienensteg gesichert wird.

Der Widerstand einer Schienenverbindung soll nicht größer sein als 0,5 bis 1,0 m Schienenwiderstand. Für Berechnungen kann man den Widerstand zu 0,0001 bis 0,0002 Ohm annehmen.

Bei Voraussetzung eines stoßlosen Gleisstranges war oben der Widerstand für einen Kilometer berechnet worden zu 0,011 Ohm. Werden nun 10,0 m lange Schienen eingebaut, so sind für einen Schienenstrang $\frac{1000}{10} = 100$ Schienen mit 100 Verbindungen erforderlich. Der Widerstand des gesamten Gleises wird jetzt somit

$$n = 0{,}011 + 200 \cdot 0{,}00015 = 0{,}041 \text{ Ohm}.$$

Der Spannungsabfall in den Schienen darf meistens innerhalb von Städten, die von verschiedenen Rohrleitungen und Telephonanlagen durchzogen sind, ca. 7 Volt nicht wesentlich überschreiten. Zur Vermeidung elektrolytischer Einflüsse auf genannte Rohranlagen und störender Einflüsse auf Schwachstromleitungen ist ein höherer Spannungsverlust nicht angängig. Bisweilen ist die zulässige Größe des Spannungsverlustes in den Schienen durch behördliche Vorschriften geregelt und häufig sogar geringer angesetzt als 7 Volt. In solchen Fällen ist es meistens bei Anlagen größerer Ausdehnung nötig, die Schienen durch besondere in die Erde verlegte Stromrückleitungskabel zu unterstützen. Die Querschnitte dieser Rückleitungskabel können unter denselben Gesichtspunkten berechnet werden wie die der Zuführungskabel, d. h. man bestimmt mit Hülfe der Schnittmethode den maximalen Spannungsverlust in den Schienen und findet auf diese Weise die Stellen, wo Rückleitungskabel anzubringen sind.

Obwohl die Kosten für eine derartige besondere Rückleitungskabelanlage bedeutend sein werden, sind die Vorteile derselben nicht zu unterschätzen. Dieselben bestehen hauptsächlich in dem geringen Spannungsverlust der Rückleitung, in dem großen Schutz gegen elektrolytische Einflüsse jeder Art der im Boden liegenden Rohr- und Kabelleitungen, in dem Schutze, der allen Fernsprechanlagen geboten wird und in der Möglichkeit, eventuell die Rückleitungskabel als Speisekabel benutzen zu können. Für letzteren Zweck müssen selbstverständlich die Kabelkästen mit entsprechenden Aus- und Umschaltern versehen sein.

Um etwaige schlecht leitende Schienenverbindungen möglichst unschädlich zu machen und die Schienen energisch zur Stromführung heranzuziehen, wird es sich empfehlen, in Entfernungen von 50 bis 60 m Querverbindungen zwischen den beiden Schienen eines Gleises herzustellen, die ähnlich wie die Schienenverbindungen elektrisch gut leitend einzubauen sind. Bei zweigleisigem Ausbau einer Strecke können auch die beiden Gleise in gewissen Intervallen miteinander gut leitend in Verbindung gebracht werden. Gute Wirkungen wird man mit diesen besonderen Verbindungen in Weichen und Kreuzungen erzielen, da hier infolge der zahlreichen einzelnen kurzen Schienenstücke der Einbau der gewöhnlichen Verbindungen an den Stößen häufig nur mangelhaft ausgeführt werden kann.

Wie schon erwähnt, ist der Spannungsabfall in den Schienen häufig behördlicherseits festgelegt, da man die Erfahrung ge-

macht hat, daß die elektrolytische Einwirkung der Nebenströme (vagabundierender Ströme) auf Wasser-, Gas- und Kabelleitungen bei vielen Bahnen bedeutend gewesen ist. Durch chemische Vorgänge wird die Oberfläche eines Rohres mit Rost bedeckt, bis schließlich die Zerstörung so weit vorwärts schreitet, daß in der Rohrwandung ein Loch entsteht. Bei Projektierungen der Rückleitung ist deshalb bei großen Anlagen wesentlich auf diese Umstände Rücksicht zu nehmen. Ausnahmen können im allgemeinen nur bei Ueberlandbahnen gemacht werden, bei denen unterirdische Rohrleitungen nicht in Frage kommen.

Eine Isolation der Rohrleitungen durch Anstrich oder Umpackungen hat erfahrungsgemäß wenig Nutzen; außerdem ist dieselbe kaum überall durchführbar und teuer. Die Möglichkeit, die Schienen so gut gegen Erde zu isolieren, daß Stromübergänge nicht eintreten können, ist ebenfalls ausgeschlossen. Eine gewisse Isolation der Schienen gegen Erde erreicht man bei Verlegung der Schienen auf Asphaltunterbettung oder aber bei Verwendung gewisser Spezialkonstruktionen. Eine solche ist die Weißsche Patentstraßenbahnschiene, die zugleich den Zweck verfolgt, den Bahnhörper möglichst unabhängig von dem übrigen Straßenkörper zu machen. Die nähere Beschreibung dieser Schiene erfolgt im Abschnitt VI.

Eine von Kapp herrührende und mehrfach verwendete Methode, die schädlichen vagabundierenden Ströme möglichst zu unterdrücken, besteht in folgendem. In der Zentrale findet außer der Betriebsdynamomaschine noch eine Akkumulatorenbatterie oder besser eine Zusatzdynamo *Z D* Aufstellung (Abb. 24). Damit eine der jeweiligen Belastung entsprechende automatische Regulierung dieser Zusatzmaschine erfolgen kann, liegt die Erregung dieser Maschine in einer Speiseleitung. Bei Benutzung einer Akkumulatorenbatterie müßte die Regelung durch Verstellen des Zellenschalters erfolgen. Durch diese präzise automatische Regulierung der Erregung und infolge der aus Abb. 24 hervorgehenden eigentümlichen Schaltung der Zusatzdynamo kann man es erreichen, daß die Schienen bei jeder Belastung so gut wie stromlos sind oder die Spannungsdifferenz in ihnen wenigstens eine nennenswerte, gefährliche Größe nicht erreicht. Diese Methode der Schienenentlastung hat z. B. in Bristol und Schöneberg bei Berlin befriedigende Anwendung gefunden.*)

*) Näheres siehe: Dr. J. Teichmüller „Ueber Methoden zur Verringerung der Gefahren vagabundierender Ströme usw. *E. T. Z. 1900 Heft 22.*

Aus allem geht jedenfalls hervor, daß die elektrischen Verbindungen der Schienen untereinander mit großer Sorgfalt auszuführen sind, da dadurch sicher einem stärkeren Auftreten vagabundierender Ströme wirksam vorgebeugt wird. Deswegen ist auch entschieden einer vollkommen stoßlosen Schienenverbindung, wie sie nach dem Goldschmidtschen oder Falkschen Verfahren erreicht wird, der Vorzug vor allen Laschenverbindungen

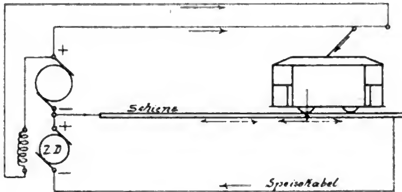


Abb. 24.

zu geben. Werden außerdem diese Schienen auf Beton- und Asphaltunterbettung gelagert, so würde das Auftreten schädlicher Nebenströme wesentlich erschwert.

Die Bestimmung des Widerstandes eines Schienenstoßes kann unter anderm mit den Schienenstoß-Prüfapparat von Dr. Paul Meyer geschehen, dessen Wirkungsweise die der Wheatstoneschen Brücke ist. (Abb. 25.)

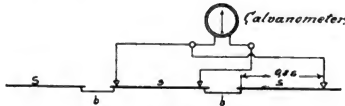


Abb. 25.

Der Apparat besteht aus einem empfindlichen Galvanometer, einer Batterie, wenn die Messungen außer Betriebe vorgenommen werden und drei Kontaktstäben, die an bestimmten, aus Abb. 25 ersichtlichen Punkten auf die Schiene aufgesetzt werden. *s* sind die durch die Stöße *b* verbundenen Schienen. Es wird bei dieser Schaltungsanordnung angenommen, daß der Schienenstoß den 0,2fachen Betrag des Widerstandes einer ganzen Schiene betragen darf. Steht die Anlage unter Strom, so ist eine besondere Batterie nicht nötig.

Die Schienenstoßwiderstände lassen sich auch mit Hülfe einer Thomsonschen Doppelbrücke von geeigneter Schaltung bestimmen.

Die Stromleitungen der elektrischen Vollbahnen. Besitzen die Bahnlinien eine solche Länge, daß sie nur unvorteilhaft von einer Kraftstation aus mit Strom versehen werden können, so können Unterstationen dazu dienen, die Hauptzentrale in der Stromlieferung zu unterstützen. Die Unterstationen können in gleichmäßigen Abständen und unabhängig von einander an einer Bahnlinie liegen oder aber sie können sich in gewisser Abhängigkeit von der Hauptzentrale befinden. Eine dritte Klasse der Unterstationen kann darin bestehen, daß von einer entfernten Kraftstation die Unterstation mit hochgespanntem Wechselstrom versorgt und dieser mittels rotierender Umformer in Gleichstrom umgewandelt wird. Bei Bahnen mit Drehstrombetrieb fallen die rotierenden Umformer weg und an ihre Stelle treten einzelne an der Bahnstrecke liegende Transformatoren.

V. Abschnitt.

Die Verlegung der Speiseleitungen.

Die Verlegung der Speiseleitungen elektrischer Bahnen geschieht meist unterirdisch. Kommen die Leitungen oberirdisch zur Verlegung, so können die Masten, die zum Tragen der Fahrdrähte dienen, gleichzeitig die Speiseleitungen an besonderen Isolatoren aufnehmen.

Bei der sehr gebräuchlichen unterirdischen Verlegung der Leitungen muß die Größe des zur Verlegung gelangenden Kabelnetzes aus einem Uebersichtsplan hervorgehen, der allen nötigen Konzessionsgesuchen, Meldungen an Elektrizitätswerken, Wasserleitungsämtern, Gasanstalten und sonstigen Behörden im Orte zu deren Orientierung beizulegen ist. Man kann sich hierzu am bequemsten eines Ortsplanes, wie er im Buchhandel käuflich zu erhalten ist, bedienen und in die Straßen die Lage der

Kabel durch rote Linien deutlich sichtbar einzeichnen. Das Einschreiben irgend welcher Maße in den Uebersichtsplan wird sich im allgemeinen erübrigen. Die tatsächliche Lage der Kabel soll aus dem Plane überhaupt nicht hervorgehen; zu diesem Zwecke werden vielmehr besondere Lagepläne (im Maßstab 1 : 500) angefertigt und in diesen, wenn nötig, durch Maßzahlen die genaue Lage der Kabel eingezeichnet. Ein Satz derartiger Pläne gehört auch auf den Bauplatz, damit der mit den Arbeiten beauftragte Unternehmer jederzeit die Möglichkeit hat, sich über die vorgeschriebene Lage der Kabelgräben Klarheit zu verschaffen. Die genaue Lage des Kabelgrabens wird am besten an Ort und Stelle im Einvernehmen mit den betreffenden zuständigen Baubehörden bestimmt.

In jeder größeren Stadt wird gewöhnlich bezüglich der Lage des Kabels ein bestimmtes Prinzip vorherrschen, indem entweder verlangt wird, das Kabel in die Fahrbahn zu legen, oder aber dasselbe im Fußwege unterzubringen. Aus verschiedenen Gründen wird das Kabel meist im Fußweg eingebettet; es werden dadurch die Aufgrabungen nicht in der Weise verkehrsstörend sein, wie wenn die Gräben in der Fahrbahn ausgeworfen werden; außerdem kommen die Kabel in größere Entfernung von den im Fahrwege liegenden Wasserleitungs-, Gas- und Schleusenrohren zu liegen. Der Graben wird in einer Breite von etwa 40 cm und bis zu einer Tiefe von 50 bis 60 cm ausgeworfen.

Die Straßenbahnkabel besitzen im allgemeinen eine Länge von 500 bis 600 m und sind auf eine Holztrommel mit hohen seitlichen Wänden aufgerollt. Die Kabel sind eisenbandarmierte Bleikabel und bestehen aus der Seele und mehreren isolierenden Hüllen, welche die Seele umschließen, um sie teils gegen Feuchtigkeit, teils gegen mechanische Beschädigungen zu schützen. Die Kabelseele wird gebildet aus mehreren Kupferdrähten, welche litzenförmig zusammengedreht sind. Einer der Drähte, der sog. Prüfdraht, über dessen Funktionen unten gesprochen werden wird, ist durch eine Umspinnung von den übrigen Drähten isoliert. Der Prüfdraht hat den Zweck, die Spannung der Speisepunkte in der Zentrale unter Kontrolle zu halten. Das Prinzip des Prüfdrahtes ist aus Abb. 26 ersichtlich. Es bedeuten $+S$ und $-S$ die Sammelschienen des Verteilungsschaltbrettes in der Zentrale, K_1 ein Zuleitungskabel, K_2 ein Rückleitungskabel, P_1 die in diesen Kabeln liegenden Prüfdrähte, V ein Voltmeter. Das letztere wird die am Speisepunkt

herrschende Spannung anzeigen und eine Störung derselben in der Zentrale sofort melden. Da die Prüfdrähte, welche zu den verschiedenen Speisepunkten führen, verschiedene Längen, also auch verschiedene Widerstände besitzen, werden dieselben, um gleiche Angaben am Voltmeter zu erzielen, durch Verschaltwiderstände *w* auf gleichen Widerstand abgeglichen.

Beim Legen eines Kabels ist darauf zu achten, daß andere Kabel, die an diesen Stellen liegen, durch unvorsichtiges Hacken

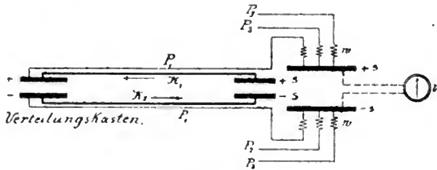


Abb. 26.

oder Einschlagen eines Pfahles nicht beschädigt werden, da die Wiederherstellungsarbeiten solcher Kabeldefekte immer ganz erhebliche Kosten verursachen und leicht zu Fehlerquellen Veranlassung geben. Um solchen eventuellen Beschädigungen nach Möglichkeit vorzubeugen, wird das verlegte Kabel mit einer schützenden Ziegelschicht überdeckt. Abb. 27 zeigt ein im

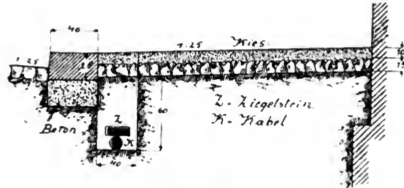


Abb. 27.

Fußwege verlegtes Kabel mit genannter Mauersteindecke. Aus der Zeichnung ist ersichtlich, daß sich unter der Kiesschicht eine Packlage befindet; der Bordstein liegt auf einer Betonschicht, an deren Stelle auch Ziegelsteinuntermauerungen an den Bordsteinstößen treten können.

Vor dem Einlegen des Kabels in den Graben ist die Grabensohle vollständig zu ebnen, und sind besonders sämtliche Steine zu entfernen, da sonst durch das Festrammen des Erdreiches beim Wiederauffüllen des Grabens leicht durch spitze Steine eine Beschädigung der Kabelisolation eintreten kann.

Liegen in einem Graben zwei oder mehrere Kabel, so ist es ratsam, dieselben durch eine Ziegelschicht voneinander zu trennen (Abb. 28), besonders, wenn die Kabel verschiedenen Verwaltungen angehören. Zur Erhöhung des Schutzes und zur Kennzeichnung der Gefahr kann, besonders bei Hochspannungskabeln 20 bis 30 cm oberhalb der Ziegelschicht, ein verzinntes Eisendrahtnetz eingelegt werden. Um bei einer Aufgrabung rasch feststellen zu können, welche Polarität jedes Kabel besitzt, befestigt man zweckmäßig an demselben bei der Verlegung in gewissen Abständen Bleistreifen, auf denen die Polarität angegeben ist.



Abb. 28.

Ein besserer, allerdings auch teurerer Schutz der Kabel wird erreicht, durch Bedeckung derselben mit langen, schmalen, mit Zement gefüllten Säcken, welche durchfeuchtet auf die Kabel aufgelegt werden. Der Zement erhärtet bald und bildet einen wirksamen Schutz. Um ein Anbacken der Säcke an das Kabel zu verhindern, liegt zwischen Sack und Kabel eine Schicht Dachpappe.

An Stelle der Zementsäcke treten bisweilen halbe glasierte Tonrohre (Schalen) Abb. 29, oder sogen. Kabelsteine aus Beton. Da die Kabelsteine eine gut isolierende Hülle bilden, werden sie vielfach bei Ueberkreuzungen von Kabeln benutzt, während auf der übrigen Strecke die Kabel nur eine einfache Abdeckung besitzen. Bisweilen wird zum Schutze der Leitungen auch Eisen verwendet. Die Kabel werden ähnlich wie bei dem zweiteiligen Kabelstein in zweiteilige eiserne Schalen gelegt, welche durch Keile oder Schrauben miteinander verbunden werden.

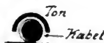


Abb. 29.

Geschieht die Verlegung des Kabels in einer Ortschaft, welche Gas- und Wasserleitung besitzt, so wird man beim Ausschachten des Kabelgrabens häufig Rohrleitungen genannter Anlagen bloßlegen und kreuzen. Da im allgemeinen diese Rohrleitungen höher liegen werden als die Grabensohle, so muß das Kabel unter ihnen hinwegezogen werden. Außerdem hat man die Erfahrung gemacht, daß häufig an solchen Kreuzungs-

stellen einer Rohrleitung mit einem Kabel nach der Verfüllung des Grabens ein Bruch genannter Rohrleitung eintritt, welcher jedenfalls dadurch herbeigeführt wird, daß einerseits das Rohr an dieser Stelle keine genügend feste Unterlage mehr besitzt, sondern frei hängt, und andererseits der Druck von oben durch das Festrammen des Bodens erheblich verstärkt wird. Aus diesem Grunde ist es angebracht, einen Ziegelkanal vor Verfüllung des Grabens über dem Rohre zu mauern, so daß es von dem Drucke des über ihm lastenden Erdreiches befreit ist. In Abb. 30 ist das Rohr in einem solchen Schutzkanal gezeichnet. Der Kanal ist mit Kalkmörtel zu vermauern; als Abdeckplatten können Ziegel, alte Granitplatten usw. gute Verwendung finden. Besitzt die Rohrleitung einen größeren Durchmesser, so ist ihr dadurch eine feste Unterlage zu geben, daß die ganze Baugrube mit klarem Sand auszufüllen und dieser dann einzuschlemmen ist.

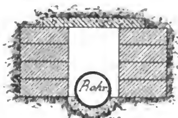


Abb. 30.

Bei Kreuzung des Starkstromkabels mit einem Telegraphenkabel der Reichspost ist zum besonderen Schutze des letzteren das Starkstromkabel in einem 3 m langen Ziegelsteinkanal über dem Schwachstromkabel zu verlegen. Der Kanal ist in ähnlicher Weise auszuführen wie der Schutzkanal in Abb. 30, nur daß er noch eine gemauerte Sohle erhalten muß, welche mit einer 30 mm starken Asphaltdecke zu überziehen ist. In Abb. 31 stellt *A* das Starkstromkabel, *B* das Schwachstromkabel und *G* den Kanal mit Asphaltbelag dar. Zur Aufmauerung des Kanals ist der Kabelgraben in doppelter Breite auszuschachten.

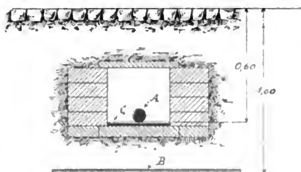


Abb. 31.

Eine besondere Verlegungsart des Kabels ist anzuraten, mitunter sogar Vorschrift, bei Unterführung des Kabels unter wichtigen Verkehrsstellen, Eisenbahn- oder Straßenbahnareal u. dgl. Um an diesen Stellen jede spätere Wiederaufgrabung des Kabels zu umgehen, verlegt man dasselbe zweckmäßig in Ton- oder Eisenrohre (Gasrohre), welche an den Stößen ab-

gedichtet werden, damit sich kein Wasser in den Röhren ansammeln kann.

Die Verbindung zweier Kabelenden geschieht nicht durch Lötung, sondern mittels kleiner Klemmkegel in ähnlicher Weise wie die Verbindung der Oberleitungsisolatoren mit den Spanndrähten. In Abb. 32 ist die Verbindung dargestellt; in der konisch ausgebohrten Hülse *a* wird die Kabelseele *c* durch den Klemmkegel *b* mit *a* fest verbunden. Der Prüfdraht wird oberhalb der Hülse durch eine kleine Klemme mit dem Prüfdraht des anderen Kabels verschraubt. Beide Kabelenden werden sodann unter Zwischenschaltung der Verbindungsstücke *d* und *e* durch eine Schraube *f* fest miteinander in Verbindung gebracht. Die Verbindungsteile der Kabel liegen in besonderen gußeisernen Gehäusen, sog. Verbindungsmuffen, wodurch sie gegen äußere Einflüsse geschützt sind.

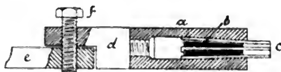


Abb. 32.

Der Anschluß des Kabels an die Oberleitung (Fahrdraht) geschieht im sog. Kabelkasten. Fig. 33 veranschaulicht die Anordnung des Kabelkastens in Verbindung mit dem Maste und der Oberleitung. Der Kasten besteht aus einem gußeisernen Gehäuse *a*, das von einem Deckel *b* verschlossen wird. Außerdem liegt auf dem Kasten noch eine Abdeckplatte *c*. Durch diesen doppelten Verschluß kann kein Wasser in das Innere des Kastens dringen. An die Anschlußöffnungen *o* des Kastens lassen sich Anschlußmuffen ansetzen, deren Konstruktion der einer Verbindungsmuffe entspricht. Das durch die Anschlußmuffe *o* eingeführte Kabel wird durch Ausschalter und Sicherung mit der isolierten Kontaktschiene *s* verbunden. An *s* schließt sich sodann, ebenfalls unter Zwischenschaltung eines Ausschalters *A* mit Sicherung das Kabel an, das den Strom an die Oberleitung abgibt. Damit dieses Kabel vor Schmutz und Nässe geschützt ist, erfolgt seine Verlegung, wie in Abb. 33 ersichtlich, teilweise in einem Gasrohr. Steht der Kabelkasten mit einem Gittermast in Verbindung, so wird das Kabel meistens in seiner ganzen Länge im Maste in Gasrohr verlegt. Um ein bequemes Ausschalten des Kabels von der Oberleitung zu ermöglichen, wird dasselbe häufig noch in bequemer, handlicher Höhe durch einen Ausschalter am Maste geleitet, der in einem kleinen eisernen Gehäuse sicher eingeschlossen ist. Das Kabel,

das oben am Maste durch ein besonderes Ausführungsstück *g* den Mast verläßt, wird, um wirksamer gegen atmosphärische Entladungen geschützt zu sein, zu einer Spule aus 8 bis

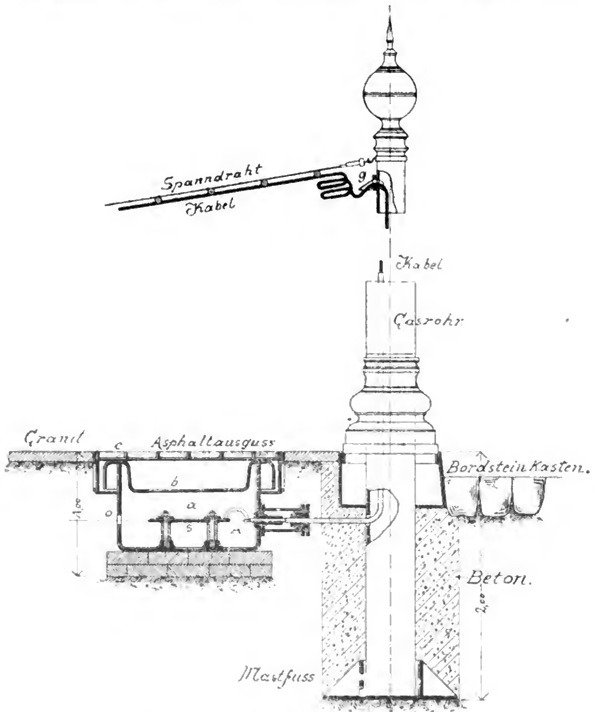


Abb. 33.

10 Windungen aufgewickelt. Durch Zwischenschalten kleiner Porzellanrollen ist es an den Spanndrähten befestigt und durch besondere Speiseklemmbacken mit den Fahrdrähten verbunden.

Da der fertige Kabelkasten ein beträchtliches Gewicht besitzt, muß er eine gute und sichere Unterlage erhalten. Er ruht deshalb auf einem in Zementmörtel gemauerten Ziegelfundament, welches in einer Tiefe von etwa 1,0 m zwei Steine hoch aufgemauert wird. Der Kabelkasten wird durch Unterschieben kleiner Holzkeile wagerecht gestellt, worauf sämtliche Zwischenräume zwischen Kasten und Fundament mit Zementmörtel ausgegossen werden. Ist auf diese Weise der Kabelkasten ausgerichtet, so wird das Kabel angeschlossen, der Graben verhüllt und der Deckel mit Asphalt ausgegossen.

Mitunter machen sich besondere Anordnungen der Speiseleitungspunkte nötig. So wird z. B. bei der Ueberkreuzung einer Straßenbahn mit einer Dampfvollbahn häufig die Bedingung

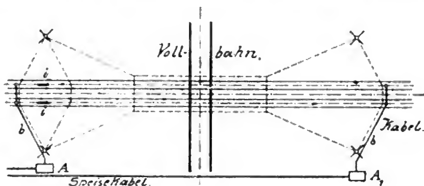


Abb. 34.

seitens der Bahnverwaltungen gestellt, daß sich mit leichter Mühe sofort der Teil der Stromleitungen über den Schienen stromlos machen läßt. Eine solche Anlage zeigt Abb. 34; *i* sind Isolatoren, die das Netz in eine rechte und linke Hälfte teilen, A und A_1 sind an den Masten angebrachte Ausschalter, in welche von unten die unterirdisch verlegten Speisekabel münden, während oben die Arbeitsleitungen durch die Kabel *b* angeschlossen sind. Durch Ausschalten des Schalters A_1 kann das Leitungsstück über den Schienen der Vollbahn stromlos gemacht werden. Allerdings kann in diesem Falle der gesamte rechts liegende Teil des Netzes keinen Strom bekommen, wenn sich nicht in allzu großer Entfernung ein dritter Speisepunkt befindet. Da letzteres jedoch häufig nicht der Fall sein wird, kann man zu einer Stromzuführungsanordnung greifen, wie Abb. 35 zeigt. Dieselbe gibt die Möglichkeit, ein kurzes Stück Oberleitung über den Gleisen der Vollbahn stromlos zu machen, während die übrige Strecke auf beiden Seiten unter

Strom stehen bleibt. Zu diesem Zwecke sind auch auf der rechten Seite der Vollbahn Streckenisolatoren *i* eingebaut. A_1 ist ein doppelter Ausschalter, mit dessen Hülfe man durch Ausschalten des linken Griffes das Drahtstück zwischen den

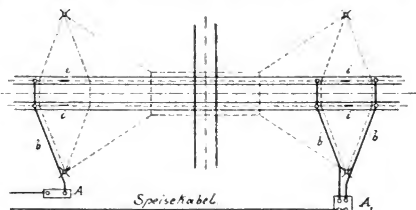


Abb. 35.

beiden Isolatoren *i* stromlos macht. Die rechts liegende Strecke wird durch den geschlossenen rechten Griff des Ausschalters A_1 weiter gespeist.

Ueberkreuzen sich zwei elektrisch betriebene Straßenbahnen (Abb. 36), so sind häufig die Arbeitsleitungen der beiden Strecken *C* und *A*—*B* an der Kreuzungsstelle durch besondere Kreuzungsstücke voneinander isoliert, so daß die Strecke *C* unabhängig von *A*—*B* Strom zugeführt erhält. Eine solche Anordnung kann vorteilhaft sein, wenn eine der beiden Linien getrennt von der anderen betrieben werden soll. Aus Abb. 36 ist die Einrichtung des Ausschalters ersichtlich. Wird der Strom in Richtung *A* zugeliefert und sind beide Ausschalter eingesetzt, so werden die Strecken *C* und *B* mit Strom versehen. Durch Herausnahme des linken Ausschaltergriffes wird *C*, durch Herausnahme des rechten Griffes *B* stromlos gemacht.

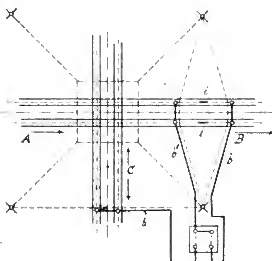


Abb. 36.

Messungen an den Leitungen.

Fehlerbestimmung bei Speiseleitungen. Um einen Isolationsfehler der Speiseleitung aufzufinden, trennt man dieselbe sowohl vom Schaltbrett als auch im Kabelkasten von dem Fahrdraht. Hierauf sendet man durch das fehlerhafte Kabel den konstanten Strom einer in der Kraftstation event. für andere Zwecke vorhandenen Dynamo D (Abb. 37). Sodann mißt man mit Hülfe eines Millivoltmeters V den Spannungsverlust zwischen dem Punkte A und dem von A um etwa 100 m entfernten Punkte B. In derselben Weise bestimmt man den Spannungsverlust in den folgenden 100 m langen Kabelstücken. Bei gleichem Querschnitt des Kabels wird der Ausschlag von V stets derselbe sein müssen, wenn die Kabelstücke keinen Defekt besitzen. Befindet sich jedoch z. B. bei C ein Erdschluß, und wird diese Fehlerstelle überschritten, so wird der Ausschlag des Instrumentes V gleich Null werden, vorausgesetzt, daß sich nicht noch an einem anderen Punkte ein Erdschluß befindet. Sind noch mehrere Fehlerstellen vorhanden, so wird die Nadel des Voltmeters sich nicht auf Null einstellen, jedoch einen nur sehr kleinen Ausschlag zeigen.

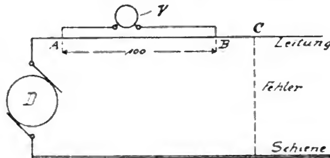


Abb. 37.

Bestimmung des Widerstandes der gesamten Leitungen. Zur Messung des Gesamtwiderstandes der Anlage bringt man (Abb. 38) in einem Motorwagen ein Ampèremeter A, ein Voltmeter V und einen Anlaßwiderstand w an. a und b sind zwei Schalter. Bei Ausführung der Messung bringt man den Wagen an das Ende der zu untersuchenden Linie und schließt zuerst den Ausschalter a des Voltmeters; es wird somit die Netzspannung E_1 bestimmt. Sodann schließt man bei geschlossenem Schalter a auch den Schalter b des Ampèremeters; die Voltzahl betrage jetzt E und die Stromstärke J. Sodann wird der Ausschalter b geöffnet und nochmals die Netzspannung gemessen.

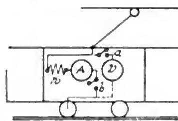


Abb. 38.

Dieselbe sei jetzt E_2. Man erhält somit als Gesamtwiderstand w den Wert

$$w = \frac{\frac{E_1 + E_2}{2} - E}{J}.$$

Bei Ausführung dieser Messung muß die Netzspannung möglichst konstant sein, auch darf nicht an anderen Stellen aus der Leitung Strom entnommen werden.

Stellt sich bei dieser Untersuchung ein zu hoher Wert des Widerstandes heraus, so ist es nötig, zu untersuchen, ob der Fehler in der Oberleitung oder in der Schienenrückleitung liegt. Es muß also jede dieser Leitungen für sich untersucht werden.

Messung des Widerstandes der Stromzuleitung. Um den Widerstand der Stromzuleitung (Speiseleitung und Fahrdraht) zu bestimmen, muß man (Abb. 39) einen Hülfsdraht h an die positive Sammelschiene in der Zentrale anlegen, der an das Ende der zu untersuchenden Linie geführt wird. Das Ende des Drahtes ist durch ein Voltmeter V mit der Oberleitung verbunden. Zwischen Oberleitung und Schiene ist außerdem ein Ampèremeter A und ein Widerstand w eingeschaltet. Schickt man von der Zentrale aus einen Strom durch die Leitung, dessen Stärke mit w reguliert werden kann, so ergibt sich aus der Spannung E und der Stromstärke J der Widerstand

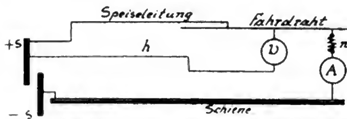


Abb. 39.

$$w = \frac{E}{J}.$$

Will man den Widerstand der Schienenrückleitung erhalten, so ist der Hülfsdraht an die negative Sammelschiene anzuschließen.

Fehlerbestimmung am Fahrdraht. Von Zeit zu Zeit ist es nötig, den Isolationswiderstand zwischen Fahrdraht und Erde zu bestimmen, d. h. also die Isolatoren im Tragwerk auf ihre Isolation hin zu prüfen. Zu diesem Zwecke benutzt man, wie in Abb. 40 gezeigt, ein Voltmeter, das einerseits

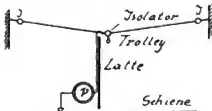


Abb. 40.

an die Schienen, andererseits mit Hülfe einer Latte an das Tragsystem gelegt werden kann. Der Ausschlag des Voltmeters ist ein Maß für die Güte der Isolation.

VI. Abschnitt.

Der Oberbau elektrischer Bahnen.

Das Planmaterial. Für den Entwurf einer elektrisch betriebenen Bahn, d. h. für die Berechnung des Kraftbedarfs der Zentrale, für die Projektierung der Gleislagen, des Tragsystemes der Oberleitung, der nötigen Gebäude und Wagenhallen, ferner für die Aufstellung von Rentabilitätsberechnungen, Kostenanschlägen usw. ist es in erster Linie erforderlich, von den Straßen und Plätzen, die beim Bau der Bahn in Frage kommen, Lage- und Situationspläne anzufertigen.

Die für ein Projekt herzustellende gesamte Aufnahme hat sich den Zwecken, die sie erfüllen soll, möglichst gut anzupassen. Deshalb soll man auch bei den häufig anscheinend unwichtigen Arbeiten des Aufmessens eines Lageplanes mit größter Genauigkeit vorgehen. Im allgemeinen bestehen behördliche Vorschriften, durch welche die Lage der Gleise im Straßenkörper bereits eng begrenzt wird. Auf beiden Seiten des Gleises oder der Gleise ist in einer gewissen Breite die Straße für den Verkehr frei zu halten. Diese äußersten Maße sollen aus Sicherheitsrücksichten unter keinen Umständen unterschritten werden, und ist deshalb die genaue Messung der Straßenbreiten an möglichst viel Stellen und besonders da, wo ein Baum, eine Stange oder anderes in die Straßenflucht hereinzuragen scheint, sehr anzuraten. Man geht damit späteren Unannehmlichkeiten aus dem Wege, indem bei Besprechung der Projekte mit den maßgebenden Behörden diese kleinen Unregelmäßigkeiten sofort erörtert werden können, und fast immer eine Einigung erzielt wird in dem Sinne, daß entweder ausnahmsweise von der Behörde eine etwas kleinere Entfernung der Schiene bis Grabenrand oder Bordsteinkante zugelassen wird, oder aber schließlich auch eine Beseitigung des Hindernisses

erfolgt. Wenn auf diese Weise schon während der Projektbearbeitung solche Schwierigkeiten genau durchgesprochen sind, tritt später keine Verzögerung in der Erteilung der Baukonzessionen oder im Baue selbst ein.

Da sich bei elektrischen Bahnbauten häufig die Verlegung von Schwachstromleitungen, Starkstromleitungen oder auch unterirdisch verlegter Kabel nötig macht, darf nicht verfehlt werden, auch diese in die Pläne einzuzeichnen, besonders auch, weil durch ihre eventuelle Umlegung eine erhebliche Erhöhung der Baukosten eintreten kann. Da man im allgemeinen nicht wissen wird, ob und wo in den Straßen Kabel liegen, wird man sich zweckmäßig mit den Postbehörden und vorhandenen Elektrizitätswerken in Verbindung setzen.

Ist das Bahnprojekt von größerem Umfange, so wird im allgemeinen die ausführende Firma am betreffenden Platze ein besonderes Baubureau errichten, welches die Aufgabe zu erfüllen hat, die Vorarbeiten an Ort und Stelle zu erledigen und die Verhandlungen mit den zuständigen Behörden zu führen. Bezüglich der Aufnahme der Situation sei noch erwähnt, daß sich die Aufmessung häufig dadurch sehr vereinfachen läßt, daß man versucht, Pläne der betreffenden Straßen auf dem Bauamte des Ortes leihweise zu erhalten. Es genügt dann häufig eine Kontrolle und Ergänzung einer Kopie dieser Lagepläne mit der Wirklichkeit, so daß ein eigentliches Aufmessen wegfallen kann. Vereinfacht wird der Entwurf selbstverständlich, wenn es sich nicht um eine vollständige Neuanlage, sondern um eine Umwandlung einer Pferdebahn in eine elektrisch betriebene Bahn handelt. In diesem Falle wird sich die Trace des Gleises nicht wesentlich ändern. Anders bei einem Neubau, bei dem stets eine mehrmalige Umänderung des Projektes geboten erscheint, da den verschiedenen Wünschen und Vorschriften von Privatpersonen und Behörden ohne weiteres nicht Rechnung zu tragen sein wird. Während für diese Vorarbeiten und Vorbesprechungen Lagepläne genügen, die mit Hülfe der einfachsten Meßinstrumente hergestellt werden, empfiehlt es sich jedoch später die gesamte Strecke von einem Geometer nochmals aufmessen zu lassen, um an Hand dieser genauen und bindenden Pläne die Materialbestellungen besser vornehmen zu können.

Es ist zweckmäßig, die Lagepläne im Maßstab 1 : 500 aufzuzeichnen und jedes Blatt etwa 1 m lang und 30 cm hoch zu nehmen. Im Höhenplane der Strecke, der gleichfalls anzufer-

tigen ist, wählt man meistens für die Längen den Maßstab 1 : 1000 und für die Höhen den Maßstab 1 : 100. Die Steigungsverhältnisse der Strecke werden in diesen Plan eingeschrieben. Ebenso sind besondere Punkte, wie z. B. Straßenkreuzungen, im Höhenplan mit anzumerken.

Schließlich sind noch außer diesen Lage- und Höhenplänen Querprofile der Straße an verschiedenen Stellen aufzunehmen

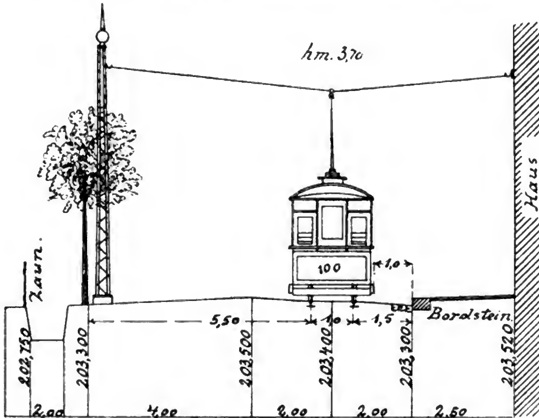


Abb. 41.

und im Maßstabe 1 : 100 aufzutragen. Man wählt hierzu hauptsächlich Stellen der Straße, an denen deren Breitenverhältnisse nicht mehr normal sind, um besonders an diesen engen Teilen ein richtiges Bild der Gleislage zu ihrer Umgebung zu erhalten. Durch Abb. 41 wird ein solches Querprofil dargestellt, während Tafel II den zugehörigen Lageplan der Straße zeigt. Aus dem Querprofil ist zu erkennen, welche Entfernungen die Bahntrace von einem im Querprofil stehenden Baum und Zaun hat und in welcher Steigung die Schienen gegeneinander verlegt werden müssen, um das Straßenprofil möglichst wenig zu ändern. Die Höhe der Trace ist in dem Querprofil aufzumessen und einzuzeichnen.

An Hand dieses einfachen Planmaterials, das keinen Anspruch auf besondere Genauigkeit machen kann, lassen sich alle wichtigen Vorbesprechungen, Berechnungen, allgemeine Anschläge jeder Art usw. erledigen, so daß nennenswerte Aenderungen des Projektes später kaum einzutreten brauchen. Allerdings ist es ratsam, bisweilen sogar behördliche Vorschrift, nach diesen allgemeinen Vorarbeiten die gesamte Bahnstrecke, wie schon bemerkt, nochmals, unabhängig vom früheren, durch einen Landesvermesser aufmessen zu lassen, da derselbe die Aufnahme mit voller Genauigkeit vornehmen kann. In diese Pläne können sodann die Gleise, Masten, Haltestellen, Gebäude usw. genau eingezeichnet werden; außerdem ist ein exakter Plan zur Bestellung des Schienenmaterials nötig, wenn Zuschneidungen an Schienen später auf der Baustelle vermieden werden sollen.

Es ist empfehlenswert, wenn der Bauleiter von Anfang bis Ende den Aufmessungen des Geometers persönlich beiwohnt, um seine Wünsche dem Geometer gegenüber sofort äußern zu können. Unbedingt nötig ist seine Anwesenheit beim Abstecken und Einmessen der Bahntrace, weil diese Arbeit die Grundlage und die Richtschnur für alle späteren Bauarbeiten darstellt. Außerdem werden sich bei dieser genauen Aufmessung stets kleine Differenzen zwischen dem Vorprojekt und der Wirklichkeit herausstellen, welche sich rascher an Ort und Stelle erledigen lassen. Um beim eigentlichen Baue die Absteckungsarbeiten für die Erdausschachtungen rasch und sicher vornehmen zu können, lasse man wichtige Punkte der Trace von dem Geometer durch eiserne Pfähle, welche in die Erde eingeschlagen werden, festlegen. Durch Einmessen der Pfähle in die Pläne wird stets später ein Wiederauffinden derselben möglich sein. Somit wird der Beginn der Strecke durch einen Pfahl gekennzeichnet, um einen sicheren Anfangspunkt für die Verlegung der Schienen zu besitzen. Ferner sind alle Tangentenschnittpunkte bei Straßenkrümmungen durch Pfähle zu markieren, da von hier aus das Abstecken der Kurven erfolgt. Auf langen geraden Strecken sind auch noch an Zwischenstellen Pfähle einzuschlagen. In Abb. 42 ist die durch die Pfähle *a*, *b*, *c* usw. festgelegte Bahntrace ersichtlich. Um ein sicheres Auffinden der Pfähle später zu ermöglichen, nimmt man 3 Aufmaße von jedem Pfahl (α, α_1 α_2 oder β, β_1, β_2). Ein späteres falsches Abstecken der Linie ist auf diese Weise ganz ausgeschlossen. Wie auch schon bei Besprechung der Herstellung der Pläne für das Vorprojekt gesagt

wurde, sind häufige Maße der Straßenbreiten sehr wünschenswert. Auch diese sind in Abb. 42 angegeben.

Um sich über die Länge der Bahn oder einiger Stücke derselben schnell orientieren zu können, versieht man die Trace im Plane mit einer Hektometrierung, d. h. vom Anfangspunkte der Bahn als Nullpunkt ausgehend, bezeichnet man den Punkt in einer Entfernung von 100 m mit 1,00, die folgenden

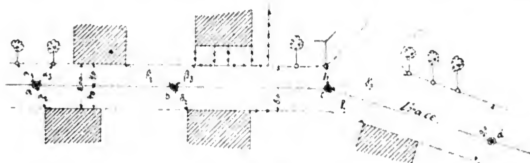


Abb. 42.

mit 2,00, 3,00 usw. Diese Hektometrierung ist auch in den Höhenplänen durchzuführen, so daß eine Vergleichung der Pläne leicht durchzuführen ist. Ferner ist auch die Lage eines jeden Querprofils im Lageplan durch Hektometrierung festzulegen, so daß rasch die Stelle jeden Profiles gefunden werden kann. Die Hektometrierung ist aus Tafel II zu ersehen.

Projektierung der Gleislage. Der Entwurf der Gleislage einer elektrischen Bahn und besonders einer elektrischen Straßenbahn ist in sehr vielen Fällen mit außerordentlichen Schwierigkeiten verbunden und gibt zu mannigfachen Abänderungen und Verhandlungen Veranlassung. Selbstverständlich ist es nicht möglich, die Lage der Gleise im Straßenkörper vollständig willkürlich zu wählen, sondern ist auf den Fußgänger- und Fahrverkehr die größtmögliche Rücksicht zu nehmen.

Im allgemeinen besitzen die Wagen elektrischer Straßenbahnen, welche an dieser Stelle eine besondere Berücksichtigung erfahren sollen, eine Breite von 2 m. Die Spurweiten der Bahnen sind allerdings sehr verschieden, jedoch ist man bestrebt, eine Normalspur von 1 m bei Neuanlagen zur Anwendung zu bringen. Auf Grund dieser Maße werden seitens der Behörden Profilzeichnungen, d. h. Umgrenzungen des lichten Raumes für elektrische Bahnen ausgegeben, die in erster Linie zur Bestimmung der Gleislage in den Straßen maßgebend sein sollen.

Durch Abb. 43 ist ein solches Profil für Personenzugsgleise, für welche auch ein späterer Güterverkehr nicht in Frage kommt, dargestellt. Aus der Abbildung ist ersichtlich, daß das Profil in einer Breite von 2,9 m und in einer Höhe von 3,75 m vollkommen frei sein soll. Es müssen also Bäume, Bordsteinkanten, Häuserecken, Zäune usw. wenigstens eine Entfernung von 1,45 m von der Achse des Gleises besitzen, also keinesfalls innerhalb des lichten Profilraumes stehen oder in denselben hineinragen. Bei einer Bahnanlage, bei der auch Güterverkehr mit in Frage kommen würde, besäße die Umgrenzung des lichten Raumes allseitig größere Maße. Nach Abb. 43 beträgt die größte Wagenbreite 2,10 m. Soll nicht einfaches Gleis, sondern Doppelgleis verlegt werden, was bei gedrängtem Betriebe und mit Rücksicht auf die Unabhängigkeit von den Weichen innerhalb einer Stadt stets vorzuziehen ist, so ist zu beachten, daß zwischen zwei sich begegnenden Wagen noch so viel Zwischenraum vorhanden sein soll, daß eventuell ein Mensch ohne Gefährdung zwischen den Wagen stehen kann. Bei Anwendung des in Abb. 43 gegebenen Profiles wurde deshalb vorgeschrieben, daß bei zweigleisiger Anlage die Entfernung der beiden Gleisachsen (die sogen. Mittelspur) 2,10 m, größte Wagenbreite + 0,40 m = 2,5 m zu betragen habe.

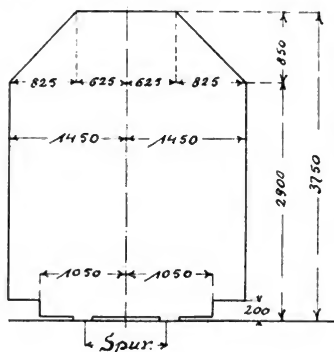


Abb. 43.

Während also einerseits die Lage der Gleise unter Berücksichtigung des Raumprofiles zu entwerfen ist, darf andererseits auch der Fuhrwerksverkehr auf der Straße neben den Gleisen keine Störung oder gar Gefährdung erleiden. Es ist deshalb notwendig wenigstens auf einer Seite der Gleise zwischen Außenkante der Schiene und Bordsteinrand eine Entfernung von etwa 3,5 m einzuhalten. Bei einer Spurweite von

1 m und einer Wagenbreite von 2,0 m verbleibt dann für den Fahrverkehr noch ein Breitenmaß von 3,0 m, was in allen Fällen zur sicheren Begegnung genügen wird. Es ist somit klar, daß in engen Straßen möglichst nur ein seitlich liegendes Gleis zu projektieren ist, während in breiten Straßen selbstverständlich das Gleis am zweckmäßigsten in der Mitte der Straße zu liegen kommt, so daß zu beiden Seiten des einfachen oder des doppelten Gleises genügend Platz zum Ausweichen für die Straßenfahrzeuge vorhanden ist. Bei der seitlichen Lage des Gleises in der Straße ist dasselbe, wenn es die Breitenverhältnisse der Straße gestatten, doch noch so weit vom Bordsteinrande wegzurücken, daß zwischen Bahnwagen und Bordstein noch kleinere Handwagen und kleinere Lasten ungehindert Aufstellung finden können.

Mit der Gleislage in der Mitte der Straße ist der Vorteil verbunden, daß die beiden Schienenstränge in vollkommen gleichem Niveau verlegt werden können, da der Scheitel der Straße mit der Bahnachse zusammenfällt und im allgemeinen die Straße nach beiden Seiten hin gleiches Gefälle besitzen wird. Liegt das Gleis dagegen seitlich, so muß häufig, um das Straßenprofil nicht zu stark zu verändern und die Entwässerung der Straße nach den Seiten hin nicht zu erschweren, die nach dem Bordstein zu gelegene Schiene beträchtlich tiefer gelegt werden, als die der Straßenmitte zu gelegene Schiene. Infolgedessen findet eine einseitige Lastenverteilung auf die Schienen und verschieden starke Abnutzung derselben statt. Man soll deshalb in allen Fällen stets bestrebt sein, die Schienen auf horizontaler Strecke in möglichst gleicher Höhe zu verlegen und eventuell das Querprofil der Straße terrassenförmig abzustufen.

Die Endstationen einer Bahn und im besonderen einer Straßenbahn, sind möglichst auf ein horizontales Stück der Strecke zu legen. Die Gleise sind an diesen Stellen mit Weichen zu versehen, damit die Wagen rangieren können. Die Abb. 44 und 45 zeigen je eine einfache Anordnung der Gleise an den Endstellen einer eingleisigen Bahn. In Abb. 44 muß *a* eine verstellbare Weiche sein, so daß nach Belieben in jedes der beiden Gleisenden eingefahren werden kann. Der Ausbau der Endstation in dieser Weise ist nur dann zu empfehlen, wenn nie mehr als zwei Wagen auf der Endstation stehen und nicht mit Anhängewagen gefahren wird.

Werden diese beiden Bedingungen nicht erfüllt, sondern kann unter Umständen eine Anhäufung der Wagen an den

Stationen eintreten und wird mit Anhängewagen gefahren, so empfiehlt zich die Ausbildung der Endstelle nach Abb. 45. Hierbei sind *a* und *b* keine Stellweichen, sondern Federweichen, so daß die von links kommenden Wagen stets in die Weiche *ab* einfahren, während die von rechts kommenden Wagen auf dem Hauptgleis weiter geführt werden. Es ist sodann ohne weiteres möglich, den Anhängewagen eines ankommenden Wagens an einen bereits vorhandenen Motorwagen anzukuppeln, nachdem



Abb. 44.



Abb. 45.

der ankommende Motorwagen mit Anhängewagen die Weichen *a* und *b* in der Richtung von links nach rechts passiert hat. Sind die Schienenstränge zwischen *a* und *b* genügend lang, so kann eine größere Anzahl Wagen Aufstellung finden.

Für zweigleisige Bahnlinien gestaltet sich der Ausbau der Endstationen auf ähnliche Weise wie in Abb. 46. Der auf der Haltestelle wartende Wagen, dessen Anhängewagen von dem bereits abgefahrenen Motorwagen mitgenommen wurde, nimmt



Abb. 46.

in *a* Aufstellung, während der ankommende Motorwagen mit Anhänger bis *b* bzw. *c* zu fahren hat. Hierauf können beide Wagen rückwärts über die Federweichen *e* und *d* auf das andere Gleis rangieren und der Anhänger *c* kann an den nunmehr abfahrenden Motorwagen *a* gekuppelt werden.

Geht, wie dies häufig der Fall ist, die innerhalb der Stadtgrenze befindliche doppelgleisige Bahn in eine eingleisige Vorortbahn über, die jedoch nur von einem Teile der Wagen befahren wird, so kann an dieser Uebergangsstelle die Station nach Abb. 47 ausgebildet werden. Mit Hülfe der Stellweiche *f* und der federnden Weiche *g* können die Wagen der Vorortlinie die

Wagen der Stadtlinie, die auf *fe* und links von *g* Aufstellung nehmen müssen, ohne Aufenthalt umfahren.

Bei einer eingleisigen Bahnstrecke müssen an verschiedenen durch den Fahrplan bestimmten Stellen Ausweichen zum Einbau gelangen. Mit Rücksicht auf eine zeitweise Steigerung des Betriebes sind dieselben nicht zu kurz zu wählen, so daß mehrere Wagen auf der Weiche Platz finden können. Gleichzeitig ist bei eingleisiger Strecke stets in Erwägung zu ziehen,



Abb. 47.

ob zeitweilig die Wagen in rascherer Folge die Strecke befahren sollen, um einen etwaigen erhöhten Verkehr an bestimmten Tagen und Stunden leichter bewältigen zu können. Soll diese Möglichkeit vorliegen, so sind die Stellen und Zahl der Ausweichen selbstverständlich für diesen erhöhten Betrieb zu bestimmen. Im übrigen achte man darauf, daß Ausweichen möglichst nicht auf Steigungen zu liegen kommen, da dadurch die Anfahrtsstromstärke erheblich gesteigert wird. Ratsam ist es auch, bei zweigleisigem Gleisausbau innerhalb gewisser Abstände Gleiswechsel einzubauen, auf den man die Wagen von dem einen auf das andere Gleis überführen kann. Bei Betriebsstörungen irgendwelcher Art können solche Gleiswechsel gute Dienste leisten, da sie die Stelle der Endstation vertreten.

Besondere Sorgfalt ist auf die Projektierung und den Einbau von Bahnkrümmungen zu verwenden. Wie oben schon erwähnt, wird besonders in Kurven mit kleinem Radius infolge der starken Reibung der Räder gegen die Schienen der Bahnwiderstand erhöht. Diese Erhöhung des Widerstandes kann beträchtlich werden, wenn die Kurvenschienen außerdem schlecht verlegt sind, so daß sich bei Straßenbahnen die Räder in den Rillen der Schienen klemmen. Die Kurven sollten deshalb stets mit möglichst großem Radius verlegt werden. Der kleinste Kurvenradius einer Bahn richtet sich nach dem Radstande des Motorwagens. Derselbe wird bei Straßenbahnen möglichst klein gehalten, 1,8 bis 2,0 m, um mit dem Wagen noch Kurven kleinerer Radien (bis 15 m) befahren zu können. Werden die Kurven als reine Kreisbögen verlegt, wie es bei Bahnen ohne eigenen Bahnkörper früher allgemein üblich war,

so muß natürlich bei der Einfahrt in die Kurve der Wagen je nach seiner Fahrgeschwindigkeit einen heftigen Stoß erhalten, da der Uebergang aus der geraden Linie in den Kreisbogen plötzlich erfolgt. Es war infolgedessen überhaupt nicht möglich, eine Kurve mit größerer Geschwindigkeit stoßfrei zu durchfahren, vielmehr muß langsam in die Kurve eingefahren und sodann von neuem angefahren werden. Zur Erhaltung eines geringen Energieverbrauches ist es deshalb auch bei Bahnanlagen kleineren Umfanges nötig, zwischen die gerade Strecke und den Kreisbogen Kurven einzuschalten, die von der Geraden mit der Krümmung Null ausgehen und allmählich mit stets wachsender Krümmung beim Uebergange in den Kreisbogen den Krümmungshalbmesser dieses Bogens erreichen.

Diese Uebergangskurven, die bei Vollbahnen bekanntlich durchgängig Verwendung finden, sollten bei Straßenbahnen wenigstens bis zu Radien von 50 m in Anwendung kommen. Es wird dadurch ein stoßfreieres Befahren der Kurven möglich gemacht, so daß der Energieverbrauch durch das Wiederanfahren auf ein geringeres Maß reduziert werden kann. Eine Kurve, die einen ziemlich gleichmäßigen Uebergang von der Geraden zum Kreisbogen schafft, ist die kubische Parabel.*)

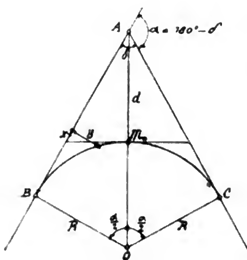


Abb. 48.

Die Kurven werden als Kreisbogen in der Weise abgesteckt, daß man (Abb. 48) Winkel α berechnet, welcher sich ergibt zu

$$\sphericalangle\, \alpha = 180^0 - \delta.$$

Dann ist die Tangentenlänge:

$$A\,B = A\,C = R \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}.$$

Die Punkte B und C markiert man durch kleine Eisenpfähle. Den Scheitelpunkt M_o des Kreisbogens bestimmt man, indem man Winkel δ mit Hülfe des Meßbandes halbiert und von A aus abträgt:

$$A\,M_o = d = A\,B \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{4}.$$

*) K. Sieber: „Uebergangskurven bei elektrischen Straßenbahnen.“ *E. T. Z. 1900, Heft 42.*

Diese drei Punkte werden im allgemeinen genügen, besonders bei kurzen Bogen. Zwischenpunkte kann man noch mittels der Kreisgleichung berechnen, die bekanntlich lautet:

$$y = R - \sqrt{R^2 - x^2} \; .$$

Man wählt verschiedene Werte von x und bestimmt y.

Sobald es die Profilverhältnisse der Straße zulassen, darf nicht versäumt werden, die äußere Schiene jeder Kurve zu erhöhen, um einem Entgleisen der Wagen und einer allzustarken Abnutzung der Schienen vorzubeugen. Niemals soll die innere Schiene höher liegen als die äußere, da dadurch der Verschleiß der Kurvenschienen ein ganz bedeutender wird. Bei Doppelgleis ist in Kurven mit kleineren Radien die Entfernung der beiden Gleisachsen zu vergrößern, da im anderen Falle zwei sich in der Kurve begegnende Wagen zusammenstoßen können. Diese Vergrößerung der Mittelspur richtet sich nach dem Radius der betreffenden Kurve und nach der Länge des Wagens.

Das Schienenmaterial.

1. Die Schienenarten. Für den Bau von elektrisch betriebenen Bahnen werden Vignolschienen und besonders bei Straßenbahnen Rillenschienen benutzt. Die Abmessungen und das Gewicht der Schiene ist selbstverständlich von der zu erwartenden Inanspruchnahme abhängig. Hierbei ist zu beachten, daß infolge atmosphärischer Einflüsse und infolge der Einwirkung des Betriebs die Stabilität leicht etwas sinkt, so daß bei der Wahl des Schienenprofiles nicht zu schwache und leichte Konstruktionen gewählt werden dürfen.

Große Verbreitung hat die Rillenschiene mit direkt eingewalzter Rille gefunden, wie sie zuerst von der Aktiengesellschaft „Phönix“ zu Laar bei Ruhrort angefertigt wurde (Abb. 49). Der Fuß dieser Rillenschiene ist so breit gehalten, daß die Verlegung der Schienen direkt auf die Bettung erfolgt ohne Zwischenschaltung von Längs- oder Querschwellen. Da diese Schienen vollständig im Erdboden eingebettet sind, also von Temperaturschwankungen kaum beeinflußt werden, können sie dicht aneinanderstoßend verlegt werden. Es werden deshalb bei gutem Einbau der Schienen nennenswerte Stöße beim Befahren derselben kaum auftreten.

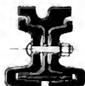


Abb. 49.

Das Gewicht der Rillenschiene für starken Betrieb soll mindestens ca. 40 kg pro laufenden Meter sein. Die Höhe der Schiene soll 150 bis 180 mm betragen, der Fahrkopf besitze

wenigstens eine Breite von 45 mm und muß so geformt sein, daß er in seiner ganzen Breite befahren wird. Die Zwangsschiene muß aus Gründen der Betriebssicherheit wenigstens 10 mm breit sein; man findet Breiten bis 20 mm. Die Rillenbreite beträgt ca. 30 mm. In Kurven mit kleinem Radius wird die Rille bis ca. 36 mm erweitert, damit sich die Spurkränze der Wagenräder nicht reiben.

Außer diesen einteiligen Rillenschienen sind für Straßenbahnzwecke auch die Haarmannschen Zwillingsschienen mannigfach im Gebrauch (Abb. 50). Bei diesem zweiteiligen Oberbau ist der Fahrschiene eine besondere Leitschiene zugesellt, die durch Sperrstücke in Abständen von 500 bis 750 m mittels starker Schrauben mit der Fahrschiene verbunden ist. Auch die Haarmannsche Schiene besitzt eine Höhe von 150 bis 180 mm, eine Breite des Schienenkopfes von 50 bis 60 mm, eine Stegstärke von 9 bis 10 mm und eine Schienenfußbreite von 120 bis 150 mm.

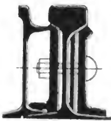


Abb. 50.

2. Die mechanische Verbindung der Schienen. Besondere Sorgfalt ist auf die mechanische Verbindung der einzelnen Schienen untereinander zu verwenden, denn infolge seiner starken Belastungen und größeren Geschwindigkeiten stellt der elektrische Betrieb an das Schienenmaterial auch in bezug auf seine Verbindung hohe Ansprüche. So erkannte man bald, daß die Stoßverbindung einer Pferdebahnschiene dem elektrischen Betriebe nicht mehr Stand zu halten vermochte, sondern sich bald lockerte. Während für Vignolschienen die beiderseitige einfache Verlaschung ausreichend ist, da diese Schienen meistens auf eisernen oder hölzernen Querschwellen liegen, bewährte sie sich für Rillenschienen, die im allgemeinen keine Schwellenunterbettung besitzen, nicht. Trotz verlängerter und verstärkter Laschen trat leicht eine Lockerung an den Stoßstellen ein. Dieser Uebelstand ist von der Aktiengesellschaft „Phönix“ dadurch zum größten Teile beseitigt worden, daß, wie in Abb. 49 zu erkennen ist, die Laschen als sog. Fußlaschen ausgebildet sind. Die Lasche ist verlängert und umklammert zur Hälfte den Schienenfuß. Die günstige Wirkung wird noch verstärkt durch eine auch in Abb. 49 ersichtliche eiserne Platte, die zwischen Schienenfuß und Laschen geschoben ist. Auf diese Weise sitzen die Enden der Schienen fest auf der Platte auf und können weder in horizontaler noch in

vertikaler Richtung ihre Lage zueinander ändern. Zwecks geräuschlosen Fahrens auf den Schienen und einer sichereren Stoßverbindung kann auch an Stelle des einfachen Stumpfstoßes ein Verblattstoß treten (Abb. 51). Es werden bekanntlich hierbei die anstoßenden Schienen im Stoße teilweise zur Hälfte abgefräst und die beiden Hälften durch Laschen und Bolzen aneinander gefügt.



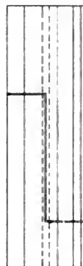


Abb. 51.

Die Haarmannschen Doppelschienen werden vorteilhaft unter Anwendung des sog. Wechselsteg-Verblattstoßes miteinander verbunden. Abb. 50 zeigt diese Verlaschung. Da der Steg der Schiene abwechselnd nach links oder rechts aus der Mittelstellung herausgerückt ist, so wird derselbe bei Anwendung des Verblattstoßes nicht geteilt, sondern auf der Länge des Stoßes sogar verdoppelt, wodurch eine gerade an dieser Stelle der Schiene besonders nötige hohe Stabilität erreicht wird.

In neuerer Zeit hat die Schienenstoßverbindung von Scheinig und Hofmann wiederholt Anwendung gefunden. Dieselbe besteht aus dem Sohlenstücke *A* (Abb. 52), dem Einschubstück *B*, dem Keil *C* und aus Zinkbeilageblechen, wenn die Schienen zur Stromrückleitung benutzt werden, um einen guten, elektrischen Kontakt zu sichern. Das Sohlenstück *A* ist aus Stahlguß gefertigt, bildet an der Stoßseite ein festes Unterlager für beide Schienenfüße und klemmt sich auf einer Seite in diese fest ein. Auf der anderen Seite ist das Sohlenstück als Widerlager für den Keil *C* ausgestaltet und bietet durch seine Form eine große Auflagefläche. Das Einschubstück *B* ist ebenfalls aus Stahlguß gefertigt und besitzt an der einen Seite einen Einschnitt, um den Schienenfuß einklemmen zu können.

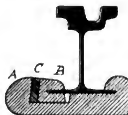


Abb. 52.

Bei der Montierung dieses Schienenfußes sind die zur Berührung kommenden Flächen metallisch rein zu machen. Sodann wird ein Zinkblech an den Schienenfuß gesteckt und das Sohlenstück *A* in glühendem Zustande mittels einer eisernen Schaufel eingelegt und festgeschlagen. Hierauf wird der Keil *C* eingetrieben und dadurch ein festes Einklemmen des Sohlenstückes und des Einschubstückes an den Schienenfuß bewirkt.

Die Länge des Schienenfußes richtet sich nach der Stärke des Schienenprofiles und der zu erwartenden Beanspruchung derselben. Das Gewicht des kompletten Schienenfußes schwankt zwischen 8 bis 24 kg.

Außer der guten mechanischen Verbindung der Schienen entsteht bei richtiger Anwendung dieses Schuhes auch eine vorzügliche elektrische Verbindung, so daß besondere elektrische Schienenverbindungen wegfallen.

Als sehr gute Schienenverbindungen, sowohl in elektrischer als auch in mechanischer Beziehung, haben sich die Schienenstoßverbindungen nach Falk und Goldschmidt bewährt. Bei der Falkschen Verbindung wird um die Schienen bis dicht an die Oberkante des Kopfes ein Klotz von Gußeisen gegossen, das in einem fahrbaren Schmelzofen an Ort und Stelle gewonnen wird. Infolge der Abkühlung zieht sich der Gußeisenklotz stark zusammen und hält die Schienen in inniger Verbindung.

Eine direkte Verschweißung der Schienen erfolgt infolge der entstehenden hohen Temperatur bei Anwendung des aluminothermischen Verfahrens nach Dr. Goldschmidt. Das zur Schweißung erforderliche Eisen wird in kurzer Zeit durch Abbrennen von Thermit (ein Gemisch aus Aluminium und einer Eisensauerstoffverbindung) in besonderen Tiegeln gewonnen. Diese sog. Spitztiegel bestehen aus einem Blechtrichter, der mit einem feuerfesten Material, Magnesia, ausgekleidet ist. Am Boden besitzen die Tiegel eine aus einem durchbohrten Magnesiastein gebildete 10 bis 15 mm weite Oeffnung, welche durch zwei Asbestscheibchen und ein Eisenplättchen verschlossen wird. Auf das Eisenplättchen wird eine Schicht Sand aufgeschüttet und festgedrückt, um ein vorzeitiges Durchschmelzen zu verhindern. Der mit dem Thermit gefüllte Tiegel wird nach Abb. 53 mittels eines Gestelles über den zu verschweißenden Schienenenden aufgestellt. Sobald die Reaktion im Tiegel nach Entzündung des Thermites vor sich gegangen ist, wird mittels des Hebels *h*

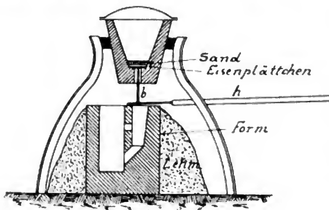


Abb. 53.

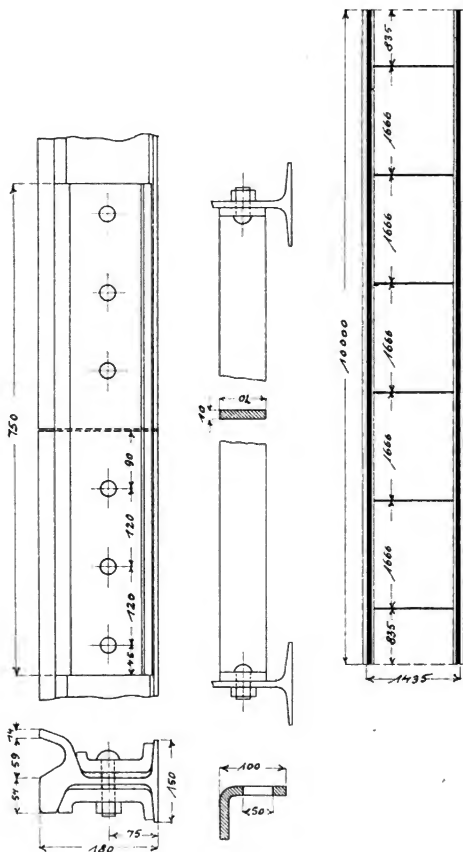
das Eisenstäbchen *b* in die Höhe gestoßen und dadurch das Eisenplättchen, welches die Tiegelöffnung verschließt beseitigt. Das Thermiteisen fließt in die Schienenform. Das Eisen, das die Zusammensetzung eines weichen Flußeisens besitzt, umfließt den Schienenfuß, erweicht denselben und bewirkt eine innige Verbindung beider Teile. Werden die Schrauben des Schienenklemmapparates, der um den zu verschweißenden Schienenstoß gelegt ist, um weniges nachgezogen, so ist die Verschweißung der ganzen Profilfläche vollendet. Die Form, die um den Stoß gelegt wird, besteht aus Lehm, Schamotte oder einem anderen feuerfesten Material.

Die Vorteile der stoßlosen Schienenverbindung liegen in dem glatten Befahren und in der gleichmäßigen Abnutzung des Schienenmaterials. Das rollende Material und der Straßenoberbau werden geschont. Außerdem bilden die verschweißten Schienen eine vorzügliche Rückleitung für den Strom.

Die Schienen müssen, sobald sie direkt auf die Gleisunterbettung gelagert sind, durch eiserne, winkelig gebogene Stangen, sogenannte Traversen, fest untereinander verbunden werden. Diese Querverbindungen dienen zur Sicherung der Spurweite und werden in Abständen von 2 bis 2,5 m mittels Schraubenbolzen an den Schienenstegen angebracht. Die genaue Regulierung der Spurweite erfolgt durch dünne Eisenblättchen, die zwischen Traverse und Schienensteg gelegt werden.

Abb. 54 zeigt die Verlaschung und Querverbindung der Schienen für eine Hafenbahn. Diese Rillenschiene unterscheidet sich durch ihre kräftigere Form und größere Rillenweite von den üblichen Straßenbahnrillenschienen, da, entsprechend ihrem besonderen Zwecke, auf dieser Schiene auch Maschinen und Wagen der Vollbahnen fahren müssen. Die Traversen, die in Abständen von 1666 mm angebracht sind, besitzen eine Höhe von 70 mm und eine Breite von 10 mm. Mittels eines angebogenen Winkeleisens von 100 mm Länge sind die Querverbindungen am Schienensteg befestigt. Die Verlaschung geschieht durch einfache Laschen von 750 mm Länge und sechs Schraubenbolzen; das Gewicht der Schiene beträgt ca. 58 kg pro lfd. m.

3. Die Weichen und Kreuzungen. Da die Weichen und Kreuzungen einer Bahnanlage denjenigen Teil bilden, der am stärksten der Beanspruchung und Abnutzung ausgesetzt ist, so ist auf die Konstruktion und den Einbau dieser Gleisteile



750
90
120
120
10000
835
1666
1666
1666
1666
1666
835
1435
70
10
14
59
150
75
180
100
50

Abb. 54.

große Sorgfalt zu verwenden. Da bei Straßenbahnen die Weichen und Kreuzungen in den Straßenkörper eingebettet sind, haben dieselben eine größere Bedentung als bei anderen Bahnen, da naturgemäß die Unterhaltung, Revision und Reinigung solcher Weichen mit größeren Schwierigkeiten verbunden ist. Auch in Straßen- und Kleinbahnbetrieben werden fast nur Weichen mit zwei beweglichen Zungen benutzt, die meistens vom Wagenführer selbst vom Wagen aus, bisweilen auch automatisch verstellt werden. Besondere Sorgfalt ist auf die Gestaltung und Befestigung der Weichenzungenwurzel zu legen, da sonst infolge der häufig auftretenden Erschütterungen eine Lockerung der Zunge und eine schiefe Lage des ganzen Weichenstückes eintreten kann. Eine der gebräuchlichsten Anordnungen der Zungenbefestigung besteht darin, daß (Abb. 55) die Zunge und das Gußstück durchbohrt und mittels eines Drehzapfens zusammengehalten werden. Da der Zapfen jedoch durch einen Keil *a* unterhalb des Gußstückes gesichert sein muß, kann diese Verbindung nur nach Aufbruch der Straßenoberfläche gelöst werden. Um das letztere zu verhindern, empfehlen sich deshalb Konstruktionen nach Abb. 56; hier ist der Bolzen *a* durch einen Keil *b* dauernd mit dem Gußstücke verbunden. Die Weichenzunge wird mittels einer Bohrung auf den Kopf des Bolzens aufgesetzt und durch Paßstücke und Keile *d* in ihrer Lage festgehalten. Durch Herausschlagen der Keile *d* kann die Zunge leicht ausgewechselt werden, ohne daß ein Oeffnen der Straßenfläche zu erfolgen hat. Die Spitzen der beiden Weichenzungen werden durch eine Stange miteinander verbunden, die in einem gußeisernen Stellkasten zwischen den Schienen untergebracht ist.

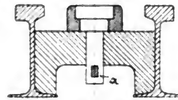


Abb. 55.

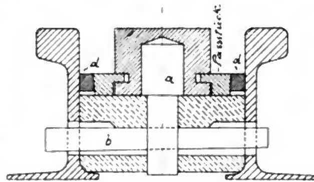


Abb. 56.

Die gleiche Aufmerksamkeit, welche die Weichen erfordern, hat man den Kreuzungen zuzuwenden. Als Beispiel ist die Konstruktion des Ueberschnittes einer Straßenbahn mit einer

Vollbahn gewählt (Abb. 57). Selbstverständlich soll die Ausführung der Kreuzung so gemacht werden, daß der Betrieb der Vollbahn keine Störung erleidet, sondern die Wagen mit unverminderter Geschwindigkeit die Kreuzung passieren können. Es ist deshalb nicht vorteilhaft, die Schienen der Vollbahn in irgend einer Weise mit Einschnitten zu versehen oder gar vollständig zu zerschneiden. Da es aber für die Straßenbahnwagen

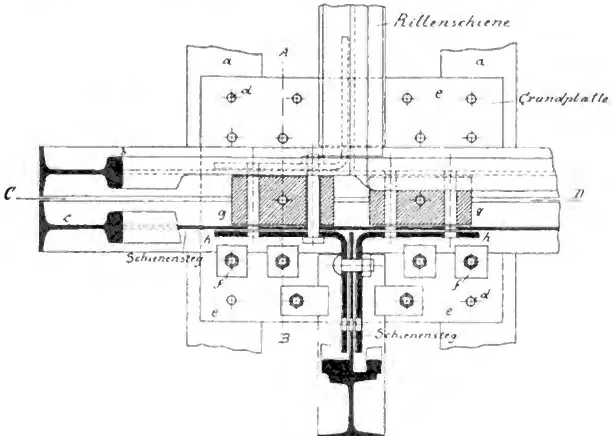


Abb. 57.

mit großen Schwierigkeiten verbunden ist, die Schienen der Vollbahn zu überfahren, wenn dieselben in keiner Weise einen Einschnitt zur Aufnahme des Spurkranzes der Straßenbahnwagenräder besitzen, so müssen die Schienen der Vollbahn doch bis zu einem gewissen Grade angeschnitten werden. Infolgedessen läßt man häufig die Wagenräder der Vollbahn beim Ueberfahren der Kreuzung nicht auf ihrer Lauffläche, sondern auf dem Spurkranz laufen. Ein Stoß, hervorgerufen durch den Einschnitt in den Schienen, wird dadurch vermieden.

Fig. 57 zeigt die Kreuzung im Grundriß mit teilweisem Schnitt durch den Schienensteg. Die Vignolschienen der Voll-

bahn sind zu beiden Seiten der Straßenbahnschienen auf Holzschwellen *a* gelagert; *b* ist die Fahrschiene, *c* eine Schutzschiene der Vollbahn. Die Kreuzung ist unter einem Winkel von 90° dargestellt. Auf den Schwellen ist durch die Schrauben *d* eine schmiedeeiserne Platte *e* befestigt; in der Mitte dieser Platte werden die beiden Vignolschienen aufgeschraubt. Die Befestigung geschieht in der Weise, daß besonders geformte Eisenstücke *f* mittels Schraubenbolzen fest auf den Schienenfuß angepreßt werden und diesen in sicherer Lage halten. Damit sich die Schienen nicht nach innen verbiegen oder verschieben, sondern die Entfernung der Schutzschiene von der Laufschiene immer konstant bleibt, sind besondere Paßstücke *g* durch Schraubenbolzen eingezogen, welche zugleich noch einem weiteren Zwecke dienen sollen. In ähnlicher Weise wird die Rillenschiene der Straßenbahn auf der Grundplatte befestigt, wobei zu beachten ist, daß die Kopfflächen der Schienen gleich hoch liegen müssen. Selbstverständlich ist es nötig, die Straßenbahnschienen zu zerschneiden, und zwar so, daß Füße und Köpfe beider Schienen scharf aneinanderstoßen (Abb. 58).

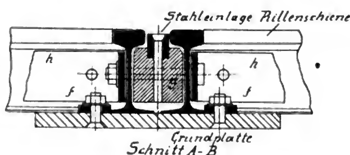


Abb. 58.

In der Verlängerung der Rille der Straßenbahnschienen sind die Vignolschienen angeschnitten, um den Spurkranz der Räder passieren zu lassen. Dieser Einschnitt ist so zu wählen, daß die Räder auf dem Spurkranz laufen, damit die Schienen der Eisenbahn keine zu starke Abnutzung an ihrer Oberfläche erleiden. Die Wagen würden jedoch einen starken Stoß erhalten, wenn sie von der Fahrschiene auf die Schutzschienen der Vollbahn übertreten würden, da diese beiden Schienen in größerer Entfernung (60 bis 70 mm) voneinander liegen. Um

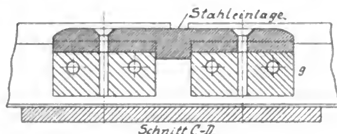


Abb. 59.

dies zu vermeiden, ist, wie Abb. 57, 58 und 59 zeigen, zwischen die beiden Vignolschienen ein besonderes herausnehmbares Einlegestück aus Stahl gelagert, welches mittels Schrauben auf die bereits früher erwähnten Paßstücke *g* aufgeschraubt wird. Die obere Fläche dieser Einlage reicht bis an die Sohle des Einschnittes, so daß auf ihr die Spurkränze der Räder laufen können. Wie aus Abb. 59 ersichtlich ist, besitzt das Einlegestück in Richtung der Vignolschienen Anlaufflächen, auf welche die Spurkränze der Vollbahnwagenräder auflaufen. Auf solche Art wird die Abnutzung der eigentlichen Kreuzungsstellen durch die Räder auf ein Minimum herabgedrückt und die Wagen sind nennenswerten Stößen nicht ausgesetzt. Nach Abnutzung des Einlagestückes kann dasselbe in kurzer Zeit durch ein neues ersetzt werden. Um die Schienen in genauer Lage zueinander zu halten, werden dieselben durch Laschen *h* verschraubt.

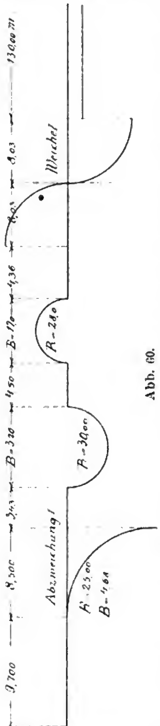


Abb. 60.

4. Die Schienenpläne. Um sich einen raschen Ueberblick über das gesamte Schienenmaterial verschaffen zu können und die Bestellungen der Schienen bei den betreffenden Werken in übersichtlicher Weise vornehmen zu können, ist es zweckmäßig, von der gesamten Gleisanlage einen besonderen Schienenplan, ein sog. Kurvenband anzufertigen. In Abb. 60 ist ein Stück eines Kurvenbandes einer Straßenbahn wiedergegeben. Hierzu ist folgendes zu bemerken: Jedes Gleis wird durch eine einfache Linie dargestellt. Von links beginnend haben wir somit erst eingleisigen Betrieb, der bei der Weiche in zweigleisigen Betrieb übergeht. Alle geraden Längen, Bögen, Radien und Weichenlängen sind deutlich ersichtlich. Selbstverständlich muß die Summe dieser Einzellängen die Gesamtlänge der Trace ergeben. Weichen und Abzweigungen sind nur in ihren Hauptdimensionen angegeben, alle Einzelmaße ergeben sich aus be-

sonderen Plänen. Kurven sind einfach durch Kreisbögen markiert, welche in ihrer Lage nach oben oder unten die Lage der Kurve wiedergeben. Jede Abzweigung, Kreuzung oder Weiche numeriere man sowohl im Kurvenband als auch im Lageplan, um rasch überblicken zu können, an welcher Stelle jedes Stück einzubauen ist.

Aus besonderen Plänen folgen die Maße der Weichen, Abzweigungen usw. In Abb. 61 ist das Maßbild eines Gleiswechsels, in Abb. 62 das Maßbild einer einfachen Abzweigung gegeben. Die Längen der einzelnen Schienen, der Zungen- und Herzstücke, die Radien und Bögen sind diesen Plänen zu entnehmen.

Die Gleisbettung. Die jeweilig zur Anwendung kommende Unterbettung der Gleise richtet sich meistens nach der Beschaffenheit des Untergrundes. Bei Straßenbahnen, die eines eigenen Bahnkörpers entbehren und in öffentlichen Wegen und Straßen eingebaut sind, werden die Querprofile des Straßenoberbaues in den meisten Fällen von den zuständigen Baubehörden vorgeschrieben und eingehend während der Ausführung kontrolliert. Um den Gleisen eine feste, unverrückbare Lage zu geben, werden dieselben auf eine Schicht Packlage, bestehend aus größeren Bruchsteinen mit guter Aufsatzfläche oder aber häufig auf eine Kalkbetonschicht aufgelegt. Die Pack-

Abb. 61.

lage besitzt eine Höhe von etwa 20 cm und wird, wie aus Abb. 63 ersichtlich ist, mit Klarschlag abgeglichen und abgewalzt. Die Schienen werden auf dieser Steinschicht verlascht, nach Höhenlage, Breitenlage und Spur ausgerichtet und mit kleinem Steinmaterial unterstopft. Dadurch werden die Schienen in richtiger Höhenlage gehalten und liegen mit der vollständigen Fußfläche auf der Packlage gleichmäßig auf. Auf die Herstellung des Oberbaues, besonders der Unterstopfung der Schienen, ist größte Sorgfalt zu verwenden, da im anderen Fall Senkungen der Gleise nicht ausgeschlossen sind. Nach der Verlegung der Schienen wird

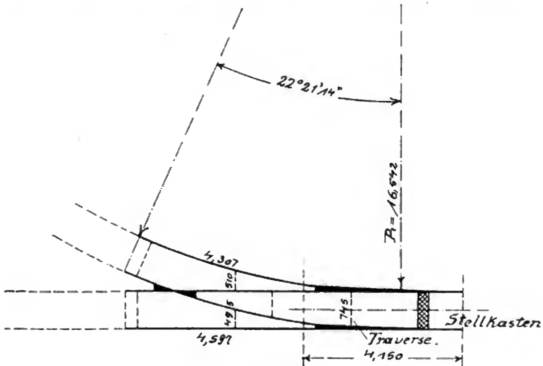


Abb. 62.

die Straße entweder chaussiert oder gepflastert (Abb. 63). Damit zwischen den Schienen und den anschließenden Pflastersteinen keine Hohlräume entstehen, empfiehlt es sich, den Zwischenraum zwischen Schienenkopf und Schienenfuß mit einer nassen Mischung von Sand und Zement zu verstreichen. Die zur Verwendung kommenden Pflastersteine müssen aus festem, widerstandsfähigem Material wie Granit, Basalt, Porphyr, fester Sandstein u. a. bestehen. Selbstverständlich muß sich die ganze Pflasterfläche, ebenso wie die Schienen, der Wölblinie der Straße anpassen. Abb. 64 zeigt das Profil einer 8 m breiten Straße mit Bordsteineinfassung. Etwa 10 bis 15 cm unterhalb

der Bordsteinkante beginnend ist zuerst auf der Länge von 0,5 m eine Schnittgerinnesteigung von 1 : 14 angenommen. Hieran schließt sich auf 0,5 m Länge eine Steigung von 1 : 25. Anfang und Ende dieser Steigung sind durch Holzpfähle festgelegt, in welche unter Benutzung einer platten Latte und einer Wasserwage die Kerbe als Höhenmarken eingeschnitten werden. Nach der Mitte zu erhält die Straße eine Steigung

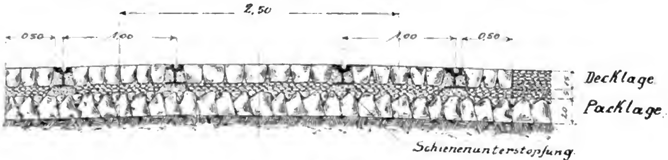


Abb. 63.

von 1 : 30 und hieran anschließend eine solche von 1 : 40. Auch diese Höhenpunkte sind in angegebener Weise festgelegt. Werden die Marken an den einzelnen Pfählen durch eine Schnur verbunden, so ist das Profil der Straße deutlich sichtbar, und Schienenverleger sowie Pflasterer haben zur Arbeit einen sicheren Anhalt.

Die zur Verwendung kommenden Pflastersteine besitzen eine Höhe von 15 bis 18 cm, eine Breite von 15 bis 22 cm und eine

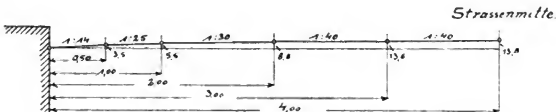


Abb. 64.

Länge von 10 bis 18 cm. Die Verjüngung des Steines nach unten zu darf nicht zu stark sein, damit der Stein eine möglichst sichere Auflagefläche besitzt. Die Pflasterung geschieht meistens in der Weise, daß die Steine in guten Sand eingesetzt werden (Abb. 63). Will man jedoch eine Pflasterdecke schaffen, die möglichst wasserundurchlässig ist, so kann Zementmörtelpflaster in Anwendung kommen. Dasselbe findet

häufig dann Benutzung, wenn als Schienenunterbettung Beton in Frage kommt (Abb. 65). Die Betonschicht besitzt eine Höhe von 20 bis 22 cm und wird fest in die Baugrube eingerammt. Der Beton ist eine Mischung von Klarschlag, Sand und gelöschtem Graukalk (etwa 2 : 2 : 1,5). Diese Betonschicht liefert eine äußerst feste und wasserundurchlässige Unterlage für das Gleis. Das Verlegen und Richten der Schienen erfolgt mit Hülfe des Stopfmaterials in derselben Weise wie oben erwähnt, nur daß hier dem Stopfmaterial eine größere Menge

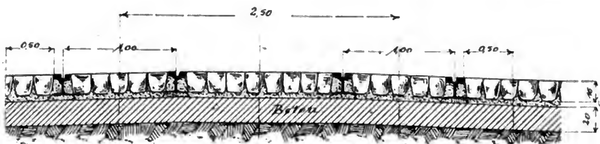


Abb. 65.

Zement beizumengen ist, um eine feste, abgebundene Lage zu erhalten. Die Pflasterung wird nicht in reinen Sand vorgenommen, sondern in einer Mischung von Sand und Zement (7 : 1). Nach dem erfolgten Abbinden bietet dieses Pflaster eine sehr widerstandsfähige Fläche.

Eine Einpflasterung der Gleise ist stets vorteilhaft, da dadurch der gesamte Oberbau von der übrigen Fahrbahn unabhängiger wird und eine Verschmutzung des Bahnkörpers nicht so leicht eintreten kann. Wie aus den Abb. 63 und 65 zu ersehen ist, wird die Pflasterung bis etwa 50 cm außerhalb der Schienen fortgesetzt.

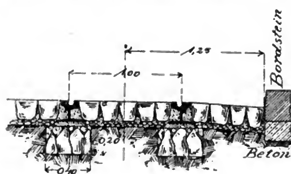


Abb. 66.

Besitzt der Baugrund erhebliche Festigkeit, besteht also nicht aus sandigen Bestandteilen, die leicht rutschen, so kann bisweilen auch ein Oberbau verwendet werden, wie er durch Abb. 66 dargestellt ist. Es kann dadurch an Baukosten gespart werden, daß die Ausschachtung der Baugrube nicht in

ganzer Bahnbreite stattfindet, sondern nur Längsstreifen unter den Schienen in einer Breite von etwa 40 cm ausgehoben werden, die mit Packlage auszusetzen sind.

Die vorstehend erwähnten Oberbausysteme, die unter ausschließlicher Benutzung einer Packlage — oder Betonunterbettung viel Verbreitung gefunden haben, und bezüglich ihrer Haltbarkeit nichts zu wünschen übrig lassen, besitzen den Nachteil großer Unelastizität, so daß die Bahnwagen mit ziemlich starkem Geräusch und eventuell unter heftigem Schaukeln die Schienen befahren. Besonders machen sich diese Nachteile bei Betonunterbettung bemerkbar. Der ungünstige Einfluß auf die Schienenstöße und das rollende Material liegt auf der Hand. Man suchte deshalb nach einem Schienenunterlager, daß diese Fehler möglichst vermindert, sich jedoch dabei als dauerhaft erweist und ohne allzuhohe Kosten herstellen läßt. Ein solches Material findet man im Asphalt. Die Verwendung des Asphaltes als Straßenbefestigung ist zurzeit bekanntlich eine sehr verbreitete, und zwar wird der Asphalt meistens als sogenannter Stampfasphalt nach bestimmtem Verfahren auf die Straßenoberfläche aufgebracht. Die in der Straße liegenden Schienen bilden bei Herstellung der Asphaltdecke kein Hindernis, da der Aspahltbelag bis dicht an die Schienenköpfe herangeführt werden kann. Unangenehme Reparaturen der Asphaltdecke können jedoch leicht dadurch eintreten, daß entweder der Asphalt sich durch die Erschütterungen von den Schienen loslöst oder infolge von Reparaturen an den Schienen selbst der Asphalt teilweise entfernt werden muß. Um diesem Flicken der Asphaltstraße aus dem Wege zu gehen, hat man durch Verwendung von Holzpflaster längst der Schienen oder durch besondere Asphaltplatten den Oberbau der Bahn von der übrigen Straße unabhängig gemacht. Die bei Holzpflasterung in der Hauptsache verwendeten Hölzer sind Harthölzer, jedoch kommen auch Weichhölzer (Kiefer, Fichte) zur Anwendung. Abb. 67 veranschaulicht die Lage einer Straßenbahnschiene in einer Asphaltstraße. Die Schiene selbst ist auf ihrer ganzen Länge mit einem Asphaltunterguß versehen, und wird dadurch ein

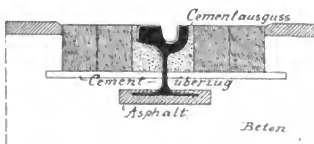


Abb. 67.

geräuschloseres und elastischeres Fahren der Wagen gewährleistet.

Eine interessante Anwendung der Vignolschiene zu Straßenbahnzwecken zeigt die Weißsche Patentstraßenbahnschiene, welche zugleich das Bestreben zeigt, den Bahnkörper vollkommen unabhängig von dem übrigen Straßenkörper zu machen (Abb. 68). Wie ersichtlich werden bei dieser Schiene ebenfalls auf einem Asphaltunterguß liegende ⊏-Eisen in bestimmter Tiefe in die Straße

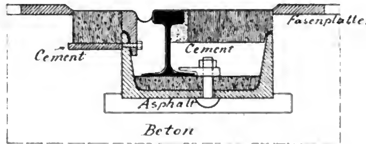


Abb. 68.

eingelegt, welche sodann mit einem Holzbelag versehen werden. Auf dieses Holz wird eine Vignolschiene von bestimmtem Profil durch Bolzen und Klauen aufgeschraubt. Die bei Straßenbahnen nötige Rille der Schienen wird dadurch gebildet, daß an das ⊏-Eisen besondere Flacheisen angeschraubt werden. Hierauf werden sämtliche Zwischenräume zwischen Schiene und

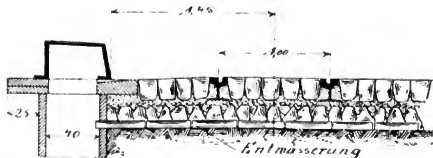


Abb. 69.

⊏-Eisen mit Zementmörtel ausgefüllt und in üblicher Weise eine Holzpflasterung zu beiden Seiten der Schiene angeordnet.

Entwässerungs-Anlagen. Jede Bahnanlage muß mit einer wirksamen und planmäßigen Entwässerungsanlage versehen sein. Damit sich in festem, lehmigem Boden das durch das Pflaster eindringende Wasser nicht versackt und zu Bodensenkungen Veranlassung geben kann, ist es ratsam, an den tiefsten

Stellen des Straßenkörpers Entwässerungen im Packlager einzubauen, die aus Drainagerohren bestehen und in den Straßengraben oder in die Schleuse entwässern. Abb. 69 veranschaulicht eine derartige Anlage. Bei Anwendung von Zementmörtelpflaster wird sich eine solche Entwässerungsanlage im allgemeinen erübrigen, da das genannte Pflaster wasserundurchlässig ist.

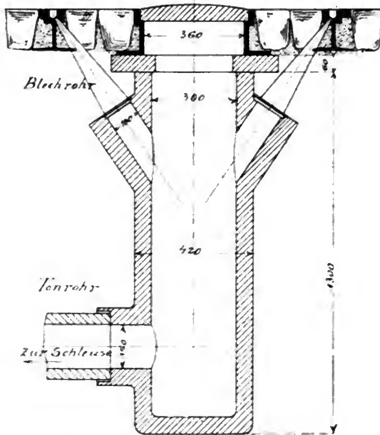


Abb. 70.

Außer dieser Entwässerung des Baugrundes ist jede moderne Straßenbahnanlage, bei der Rillenschienen zum Einbau kommen, mit Entwässerungsanlagen der Rillenschienen selbst ausgestattet. Das in den Rillen fließende Regenwasser sammelt sich an den Brechpunkten der Straße und tritt aus den Rillen auf das Straßenpflaster. Die Folge hiervon ist ein Auswaschen des Pflasters und ein Aufweichen der Straßenbefestigung. Gleichzeitig bilden die entstehenden Wasserlachen ein unangenehmes Verkehrshindernis. Die Entwässerungsanlage besteht aus einem

gußeisernen Kasten, der zwischen den Schienen an den geeigneten Stellen im Straßenkörper eingelassen wird und mit den durchbohrten Rillen der Schienen in Verbindung steht. In dem Kasten sammelt sich das Wasser an und wird nach Absetzung des Schlammes in die Schleusenanlage der Straße weitergeführt.

An die Stelle der eisernen Entwässerungskästen werden auch Schächte aus Beton zwischen den Schienen eingebaut, die durch seitliche Ansatzstücke mit den Schienen unter Zwischenschaltung konischer Blechröhren verbunden sind und das Wasser aufnehmen. Auf den Betonschacht ist, ähnlich wie bei Schleusenschächten, ein eiserner Kasten aufgesetzt, der mit einem eisernen Deckel verschlossen wird (Abb. 70). Seitlich unten am Schacht befindet sich ein weiteres Ansatzstück, das die Verbindung mit der Hauptschleuse herstellt, um das aufgenommene Wasser abzuführen. Die Stellen, an denen man Entwässerungen einbauen soll, ergeben sich aus einem Höhenplan der Straße, da natürlich an allen tiefliegenden Punkten der Straße sich das meiste Wasser ansammeln wird.

VII. Abschnitt.

Die Stromzuführung elektrisch betriebener Fahrzeuge.

Mit Bezug auf die Art der Stromzuführung zum Motor eines elektrisch betriebenen Fahrzeuges kann man unterscheiden:

a) Das oberirdische Stromzuführungssystem.

b) Das unterirdische Stromzuführungssystem. (Mit Schlitzkanal oder Teilleiter.)

c) Die Stromzuführung von den Akkumulatoren des Wagens aus.

d) Die gleichzeitige Benutzung des oberirdischen oder unterirdischen Zuführungssystemes in Verbindung mit der Stromzuführung aus mitgeführten Akkumulatoren.

a) Das oberirdische Stromzuführungssystem.

1. Fahrdraht und Stromabnehmer. Die Stromzuführung (Arbeitsleitung, Oberleitung, Fahrdraht) besteht in den meisten Fällen aus gezogenem Kupferdraht mit einer Leitungsfähigkeit von etwa 96 % des reinen Normalkupfers. Die Zugfestigkeit beträgt ca. 40 kg pro 1 mm² bei einer Temperatur von 15 °. Am gebräuchlichsten ist der runde Querschnitt des Fahrdrahtes mit einem Durchmesser von 7—8 mm. In neuerer Zeit werden indessen auch häufig sogenannte Profildrähte in Anwendung gebracht, deren Querschnittsformen erheblich von der gewöhnlichen runden Form abweicht. Als wesentliche Vorzüge des Profildrahtes sind die bequeme und sichere Befestigungsweise des Drahtes an den Aufhängungsisolatoren und die bequemere Aufbringung von Schutzvorrichtungen für Schwachstromleitungen zu nennen. Hierzu kommt noch die Vergrößerung der Berührungsfläche des Drahtes mit dem Stromabnehmer.

Der unter normalen Verhältnissen auf horizontaler, gerader Strecke über der Mitte des Gleises zu spannende Fahrdraht besitzt je nach der Art der elektrischen Bahnanlage eine verschiedene Höhenlage. Bei Bahnen, die öffentliche Wege und Verkehrsstellen befahren und nicht wie z. B. die Grubenbahnen an sehr niedrige Profile gebunden sind, ist die Höhe des Drahtes über Schienenoberkante gewöhnlich durch behördliche Vorschriften geregelt und beträgt normal meistens 6 m. Eine Verkleinerung dieser Höhe bis auf etwa 5 m ist häufig anzutreffen (z. B. beim Durchfahren von Brücken).

Da die Schienen bei Gleisbahnen vielfach als Stromrückleitung dienen, macht sich bei Gleichstrombahnen nur die Anbringung eines Fahrdrahtes nötig. Bei gleislosen Bahnen dagegen müssen selbstverständlich auch zwei Fahrdrähte, die den Strom an je einen Stromabnehmer abgeben, benutzt werden. Die für oberirdische Stromzuführung in Betracht kommenden Stromabnehmer für elektrische Bahnen sind das Bügelsystem, das Rollensystem, der muldenförmige Abnehmer und der Gleitschuh auf der sogen. dritten Schiene. Der große Vorteil des Bügelkontaktes gegenüber dem Rollenkontakt liegt in der bedeutenden Vereinfachung des Tragwerkes der gesamten Oberleitung, da Weichen, Kreuzungen usw. fortfallen können. Das Bügelsystem hat deshalb auch bei Schnellbahnanlagen befriedigende Resultate geliefert.

Dagegen besitzt die Rolle den Vorteil einer leichteren Konstruktion, eines besseren Aussehens und eines geringen Luft-

profiles. Auch bei Anwendung des Rollenkontaktes können die Luftweichen bei eingleisigen Strecken in Wegfall kommen, wenn nicht nur ein, sondern zwei Fahrdrähte gespannt werden, so daß der eine für die Hinfahrt, der zweite für die Rückfahrt benutzt werden kann.

Der muldenförmige Stromabnehmer hat bei gleislosen Bahnen (Schiemann) Anwendung gefunden, da er ein Ausweichen des Fahrzeuges nach jeder Seite hin in weitem Maße zuläßt, ohne zu entgleisen. Es ist infolgedessen dem elektrisch betriebenen Wagen möglich, anderen Fahrzeugen auszuweichen bzw. dieselben zu überholen.

Das oberirdische Stromzuführungssystem eignet sich sowohl für Bahnen mit Gleichstrom- als auch mit Wechselstrombetrieb. Selbstverständlich muß sich bei mehrphasigem Wechselstrom die Anzahl der Zuführungsdrähte erhöhen. Von einer Benutzung der Schienen als Leitung wird in solchen Fällen vielfach abgesehen.

2. Die Aufhängung des Fahrdrahtes. Die Aufhängung der Oberleitung kann erfolgen:

an Querdrähten aus Stahl, welche entweder an Masten oder Mauerhaken aufgehängt werden, oder:

an Masten mit Auslegern, wobei sowohl ein als auch gleichzeitig zwei Ausleger an einem Maste in Anwendung kommen können.

Die über der Mitte des Gleises hängende Arbeitsleitung besitzt einen gewissen Durchhang, dessen Größe je nach der herrschenden Temperatur verschieden ist.

Bedeutet:

w die Entfernung der Aufhängungspunkte in m,
H die Tangentialkraft im tiefsten Punkte der Kurve in kg,
f den Durchhang des Fahrdrahtes in m,
σ das Gewicht eines Meters Fahrdraht in kg bei einem Querschnitt von 1 mm²,

so ist (Abb. 71)*):

$$H = \frac{\sigma \cdot w^2}{8 \cdot f} \text{ kg/mm}^2.$$

Die Zugspannung K in den Stützpunkten besitzt den Wert

$$K = \frac{\sigma \cdot w^2}{8 \cdot f} + \sigma \cdot f = H + \sigma \cdot f \text{ kg/mm}^2.$$

Beachtet man ferner, daß die Temperaturen, denen der Fahrdraht unterworfen ist, zwischen -20^0 und $+30^0$

*) *Dr. G. Rasch, E. T. Z. 1897.*

schwanken können, daß weiterhin der Elastizitätsmodul für Kupfer bezogen auf 1 cm² $E = 1\,200\,000 - 1\,300\,000$, der Ausdehnungskoeffizient $\alpha = 0{,}001643$ und $\sigma = \frac{1}{112}$ betragen, so gilt:

$$\frac{\sigma^2 \cdot w^2}{24} \cdot \left(\frac{1}{H^2} - \frac{1}{H_0^2}\right) = \alpha \cdot (t - t_0) + \frac{1}{E} \cdot (H - H_0).$$

Hierbei ist die Zugfestigkeit des Kupfers zu 23 kg/mm², die niedrigste in Betracht kommende Temperatur t_0 zu -20^0 und H_0 zu 4 kg/mm² (bei fast 6facher Sicherheit) angenommen.

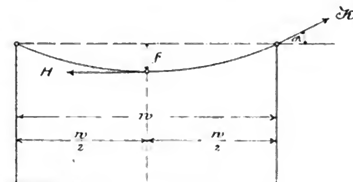


Abb. 71.

Aus dieser Formel kann man die für eine bestimmte Temperatur und bestimmte Entfernung w resultierende Tangentialkraft H berechnen. Letztere wird sich bei wachsender Temperatur wesentlich verringern. Mit Hülfe der Formel

$$f = \frac{\sigma \cdot w^2}{8 \cdot H}$$

kann sodann der Durchhang bei der gegebenen Temperatur und Spannweite berechnet werden.

So ergeben sich z. B. für die gewöhnliche Entfernung der Aufhängepunkte $w = 35$ m und verschiedene Temperaturen folgende Werte:

Temp. in C°	H in kg/mm²	f in mm
— 20	4,00	342
— 15	3,60	380
— 10	3,31	412
— 5	3,06	447
0	2,87	481
+ 5	2,67	511
+ 10	2,50	546
+ 15	2,37	576
+ 20	2,26	605
+ 25	2,15	635
+ 30	2,06	664

Zur Aufhängung der Leitung werden Drähte benutzt, die meistens aus sieben verzinkten Stahldrähten von je 2 mm Durchmesser mit einem Gesamtquerschnitt von etwa 22 mm² und einer Zerreißfestigkeit von ca. 1300 kg als Litze hergestellt sind.

Die Zugspannungen in diesen Querdrähten lassen sich *(Rach, E. T. Z. 1897)* folgendermaßen berechnen:

Es sei nach Abb. 72 s die Spannweite des Abspanndrahtes, d. h. die Entfernung der beiden Aufhängepunkte I und II. In Punkt III sei der Isolator mit dem Fahrdraht befestigt. Die auf diesen Punkt wirkenden Kräfte lassen sich in die Komponenten x und y zerlegen. Die Vertikalkraft y wird gebildet durch das Gewicht des Fahrdrahtes, des Abspanndrahtes und des Isolators; die Horizontalkraft x wird durch den Winddruck auf den Fahrdraht erzeugt.

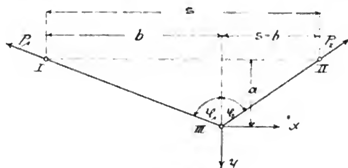


Abb. 72.

Es ist:

$$P_1 = \frac{y \cdot (s - b) + x \cdot a}{s \cdot \cos \varphi_1} \text{ kg},$$

$$P_2 = \frac{y \cdot b - x \cdot a}{s \cdot \cos \varphi_2} \text{ kg}.$$

Für die Winkel φ_1 und φ_2 gilt nach Abb. 72:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{b}{a}, \qquad \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{s - b}{a}.$$



Abb. 73.

Den Durchhang a wählt man meistens so, daß bei einer mittleren Temperatur eine Neigung des Drahtes von 1 : 10 (zwischen Masten) bis 1 : 25 (zwischen Häusern) entsteht. Nach Abb. 73 ist z. B.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{a}{9} = \frac{1}{25},$$

hieraus folgt

$$a = 0{,}360 \text{ m}.$$

Sind z. B. die Aufhängepunkte einer einfachen Oberleitung von 50 mm² Querschnitt 35 m auf gerader, horizontaler Strecke voneinander entfernt, so berechnen sich die Zugspannungen P_1 und P_2 in den Aufhängepunkten bei einer Spannweite $s = 12$ m und $b = 3$ m wie folgt.

Die Vertikalkraft y setzt sich zusammen aus:

Gewicht der 35 m langen Fahrleitung $= \frac{35 \cdot 50}{112} = 15{,}62$ kg

Gewicht des 12 m langen Querdrahtes (bestehend aus 7 einzelnen Drähten von je 2 mm Durchmesser) .... $= 1{,}89$ „

Gewicht der Isolatoren am Fahr- und Spanndraht $= 4{,}70$ „

somit $y = 22{,}21$ kg

Der Winddruck, der durch die Horizontalkraft x dargestellt wird, berechnet sich zu

$$p = x = \frac{2}{3}\, l \cdot d \cdot p_1,$$

wenn l = Länge des Drahtes in m,
d = Durchmesser des Drahtes in mm²,
p_1 = Winddruck in kg/m².

Erfahrungsgemäß beträgt p_1 im Maximum etwa 180 kg.

Man erhält somit

$$p = x = \frac{2}{3} \cdot 35 \cdot 0{,}008 \cdot 180 = 33{,}6 \text{ kg}.$$

Der Druck, der infolge von Schnee, Reif, Regen usw. auf die Leitung ausgeübt wird, kann vernachlässigt werden, da er kleiner ist als der Winddruck und beide zusammen bei geringer Luftbewegung nicht in Frage kommen werden.

Wählt man für die Spannweite $s = 12$ m einen Durchhang a des Spanndrahtes von 360 mm, so ist

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{b}{a} = \frac{3}{0{,}36} = 8{,}333,$$

also

$$\cos \varphi_1 = 0{,}118;$$

ferner

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{s - b}{a} = \frac{12 - 3}{0{,}36} = 25{,}00,$$

also

$$\cos \varphi_2 = 0{,}040,$$

somit wird

$$P_1 = \frac{22{,}21 \cdot 9 + 33{,}6 \cdot 0{,}36}{12 \cdot 0{,}118} = \text{ca. } 150 \text{ kg},$$

$$P_2 = \frac{22{,}21 \cdot 3 - 33{,}6 \cdot 0{,}36}{12 \cdot 0{,}04} = \text{ca. } 113 \text{ kg}.$$

Da die zulässige Beanspruchung des Stahldrahtes auf Zug zu 10 kg/mm² angenommen werden kann und ferner der gesamte Drahtquerschnitt 22 mm² beträgt, so sind vorstehend berechnete Zugspannungen P_1 und P_2 als vollkommen zulässig zu betrachten.

Da bei den üblichen Neigungen der Querdrähte von 1 : 10 bis 1 : 25 die Winkel φ kleine Werte besitzen, so können die Werte der Zugspannungen P_1 und P_2 im Drahte auch ohne

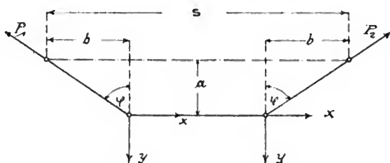


Abb. 74.

weiteres als die Werte der Horizontalkomponenten an den Aufhängepunkten betrachtet werden. Diese Horizontalkraft am Aufhängungspunkte eines Drahtes muß, wie später gezeigt werden wird, bei Berechnung der Masten bzw. Wandhaken bekannt sein.

Ist der Querdraht mit zwei Arbeitsleitungen belastet (Abb. 74), so bestimmen sich die Zugspannungen im Drahte bzw. die Horizontalkräfte an den Aufhängepunkten zu

$$P_1 = \frac{y \cdot s + 2x \cdot a}{s \cdot \cos \varphi},$$

$$P_2 = \frac{y \cdot s - 2x \cdot a}{s \cdot \cos \varphi}.$$

Die Höhe der Befestigungspunkte über Schienenoberkante. Für die Höhe des Mast- bzw. Mauerhakens über Schienenoberkante ist außer der Höhe der Arbeitsleitung über der Schiene

selbstverständlich die Straßenbreite maßgebend. Im allgemeinen beträgt die Höhe d des Isolators (Abb. 75) über Schienenoberkante 6,00 m. Bei einer Neigung des Querdrahtes von 1 : 10 bis 1 : 25 können bei der Entfernung l_m der Gleismitte vom Maste bzw. von der Wand folgende Werte für h benutzt werden:

l_m	h_m
10	85—90
9	75—80
8	70—75
7	60—65
6	55—60
5	45—50
4	40—45.

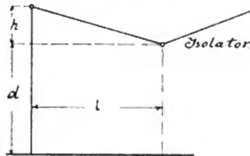


Abb. 75.

Bei größeren Entfernungen ist, wie schon erwähnt, das Verhältnis des Durchhanges des Spanndrahtes zur Entfernung der Gleismitte bis Mast bzw. Mauer 1 : 10 bis 1 : 25 zu wählen, d. h. also im Mittel etwa

$$h : l = 1 : 15.$$

Zu beachten ist, daß die Höhe der gegenüberliegenden Haken verschieden ist, wenn das Gleis nicht in der Mitte der Straße liegt. Da bei Kurvenabspannungen infolge des stärkeren Zuges im Spanndraht der Durchhang geringer wird als auf gerader Strecke, so ist bei a (Abb. 76) der Haken etwas niedriger anzuordnen als der Tabelle entspricht.

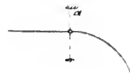


Abb. 76

3. **Die Abspannung des Fahrdrahtes auf gerader Strecke.** Die Entfernung der Stützpunkte auf gerader Strecke soll etwa 30 bis 35 m betragen. Größere Entfernungen zu wählen ist im allgemeinen nicht ratsam, damit einerseits der Durchhang des Fahrdrahtes nicht zu groß wird und andererseits das Tragwerk bei Befahrung der Strecke nicht in Schwankungen gerät, wodurch ein sicherer Kontakt zwischen Fahrdraht und Stromabnehmer unmöglich wird. Außerdem richtet sich die Entfernung der Stützpunkte nach lokalen Verhältnissen. Bei Bahnen, die wie Straßenbahnen keinen eigenen Bahnkörper besitzen und die durch Straßen geführt werden, an denen sich Gebäude befinden, muß beim Entwurfe des Tragsystemes im wesentlichen davon ausgegangen werden, daß möglichst viel Wandhaken zur Befestigung der Querdrähte in Anwendung

kommen, da dadurch die Anlagekosten der Bahn bedeutend verringert werden.

Am Anfange und am Ende der Strecke ist die Arbeitsleitung zweckmäßig zu verankern, damit bei der Montage der Oberleitung letztere einen festen Halt besitzt und dem herrschenden Zuge nicht nachfolgen kann. Abb. 77 veranschaulicht die Anfangs- bzw. Endverankerung des Arbeitsdrahtes bei eingleisiger Strecke mit **einem** Fahrdraht. Abb. 78 zeigt eine Verankerung bei eingleisiger Strecke, aber mit **zwei** Fahrdrähten. Abb. 79 endlich zeigt die Verankerung der Drähte bei zweigleisiger Strecke. In dem Plane (Tafel II) sind die Fahrdrähte und Abspanndrähte durch gestrichelte Linien kenntlich gemacht. Alle sonstigen zum Tragwerk gehörigen Teile, wie Isolatoren, Ausschalter, Luftweichen usw., werden im Plane nicht angegeben.

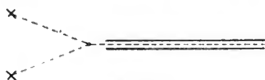


Abb. 77.



Abb. 78.

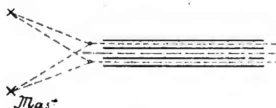


Abb. 79.

4. Die Abspannung des Fahrdrahtes in Kurven. In Weichen und Kurven erfordert die Abspannung des Fahrdrahtes besondere Sorgfalt. Da es nicht möglich ist, die Arbeitsleitung im Anschluß an das Gleis vollkommen kreisförmig zu verlegen, wird sie als Polygon gespannt. Bei Anwendung eines Bügelkontaktes können die Polygonseiten eine größere Länge erhalten, da der ziemlich breite Bügel eine beträchtliche Abweichung des Fahrdrahtes aus der Gleismitte zuläßt, ohne daß die Leitung vom Stromabnehmer abrutscht. Bei Benutzung eines Rollenkontaktes dagegen dürfen die Polygonseiten nicht zu lang sein, um die Rolle nicht ausspringen zu lassen.

Bezeichnet man die seitliche zulässige Abweichung des Bügels bzw. der Rolle mit s (Abb. 80 und 81), und werden durch die Kreisbögen $a—a$ und $b—b$ die Wege des Bügels bzw. der Rolle bei seitlicher Abweichung von der Gleisachse $c—c$

um den Wert s bestimmt (Abb. 82), so werden die Sehnen AB, BC usw., welche in den Punkten E, F usw. den inneren Kreis tangieren, diejenigen Polygonseiten ergeben müssen, die die Abweichung des Bügels oder der Rolle in den zulässigen Grenzen halten, ferner aber auch gleichzeitig die geringste Anzahl von Polygonseiten und somit Abspannpunkten ergeben.

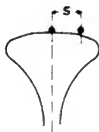


Abb. 80.



Abb. 81.

Die Länge der Polygonseite berechnet sich aus der Beziehung

$$\left(\frac{w}{2}\right)^2 = (R + s)^2 - (R - s)^2$$

zu

$$w = 4 \cdot \sqrt{s \cdot R}.$$

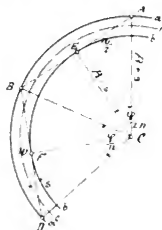


Abb. 82.

Mit Benutzung dieser Formel erhält man für verschiedene Kurvenradien und für ein Bügelsystem mit einer seitlichen Abweichung von $s = 0{,}5$ m folgende Längen der Polygonseiten.

Radius in m	Sehne in m
12	9,8
15	11,0
20	12,7
25	14,2
30	15,5
40	17,9
50	20,0
60	21,9
80	25,3
100	28,3
120	31,0
150	34,7
180	37,9
200	40,0

Kurven mit größerem Radius als 200 m werden als gerade Strecken behandelt.

Bezeichnet φ den Zentriwinkel der Kurve und n die Anzahl der Polygonseiten, so ist nach Abb. 82

$$\sin\frac{\varphi}{2n} = \frac{\frac{w}{2}}{R+s}.$$

Hieraus folgt

$$\frac{w}{2} = (R+s)\cdot\sin\frac{\varphi}{2n}$$

oder, da $s\cdot\sin\frac{\varphi}{2n}$ sehr klein ist, angenähert:

$$\frac{w}{2} = R\cdot\sin\frac{\varphi}{2n}.$$

Da $\frac{\varphi}{2n}$ ein kleiner Winkel ist, so kann man setzen

$$\sin\frac{\varphi}{2n} = \frac{1}{2n},$$

so daß man erhält

$$\frac{w}{2} = R\cdot\frac{1}{2n},$$

oder:

$$n = \varphi\cdot\frac{R}{w}.$$

Wird für w der Wert $4\cdot\sqrt{R\cdot s}$ eingesetzt und der Winkel im Gradmaß ausgedrückt, so erhält man als kleinsten Wert für die Anzahl n der Polygonseiten

$$n = \frac{\varphi^0\cdot\pi\cdot R}{180\cdot 4\cdot\sqrt{R\cdot s}} \geqq \frac{\varphi^0}{229}\cdot\sqrt{\frac{R}{s}}.$$

Unter Benutzung der soeben entwickelten Ausdrücke für n und w läßt sich für einen Bügelkontakt mit zulässiger seitlicher Abweichung von $s = 0{,}45$ m und für Zentriwinkel von 30^0 bis 165^0 nebenstehende Tabelle aufstellen.

Bei Anwendung des Rollenkontaktes ist darauf zu achten, daß die Rollen beim Einlaufen in die Kurve nicht entgleisen. Um dies zu verhindern, muß die Anzahl der Polygonseiten eine größere sein als bei dem Bügelkontakt, da die Rolle eine maximale Abweichung nach beiden Seiten von nur etwa 0,30 m zuläßt. Um diese Abweichung nicht übermäßig zu vergrößern, sobald das Gleis in der Kurve mit Ueberhöhung der äußeren Schiene zur inneren verlegt ist, ist es ratsam, den Fahrdraht

um den Neigungswinkel zu verschieben, so daß die Kurve, die der Fahrdraht bildet, innerhalb der Gleisachse zu liegen kommt. (Abb. 83.)

Zentriwinkel	$R=10$		$R=20$		$R=30$		$R=40$		$R=50$		$R=60$	
Grad	n	w	n	w	n	w	n	w	n	w	n	w
30	1	5,2	1	10,5	2	7,9	2	10,5	2	13,0	2	15,7
45	1	7,8	2	7,9	2	11,8	2	15,7	3	13,1	3	15,7
60	2	5,2	2	10,5	3	10,5	3	14,0	3	17,4	4	15,7
75	2	6,5	2	13,1	3	13,1	4	13,1	4	16,3	4	19,7
90	2	7,8	3	10,5	4	11,8	4	15,7	5	15,7	5	18,8
105	3	6,1	4	9,2	4	13,8	5	14,7	5	18,4	6	18,3
120	3	7,0	4	10,5	5	12,5	5	16,8	6	17,5	7	17,9
135	3	7,8	4	11,8	5	14,1	6	15,7	7	16,9	7	12,2
150	4	6,6	5	10,5	6	13,1	7	15,0	7	18,7	8	19,6
165	4	7,2	6	9,6	6	14,1	7	16,5	8	20,6	9	19,2

Zentriwinkel	$R=70$		$R=80$		$R=90$		$R=100$		$R=110$		$R=120$	
Grad	n	w	n	w	n	w	n	w	n	w	n	w
30	2	18,3	2	20,9	2	23,5	2	26,1	3	19,1	3	20,9
45	3	18,3	3	20,9	3	23,5	3	26,1	4	21,5	4	23,5
60	4	18,3	4	20,9	4	23,5	4	26,1	5	23,0	5	25,1
75	5	18,3	5	20,9	5	23,5	5	26,1	6	23,9	6	26,1
90	5	22.0	6	20,9	6	23,5	6	26,1	7	24,6	7	26,9
105	6	21,3	7	20,9	7	23,5	7	26,1	8	25,2	8	27,5
120	7	20,9	7	23,9	8	23,5	8	26,1	9	25,5	9	27,9
135	8	20,6	8	23,6	9	23,5	9	26.1	10	25,8	10	28.2
150	9	20.4	9	23.3	10	23,5	10	26,1	11	26,1	11	28.5
165	9	22.4	10	23,0	11	23,5	11	26,1	12	26,3	12	28,8

Die Tabelle ist in der Weise zu benutzen, daß man sich aus dem Lageplan den zu einem Kurvenradius gehörigen Zentriwinkel φ bestimmt und der Tabelle den zugehörigen Wert von n und s entnimmt.

Auch für den Rollenkontakt läßt sich eine einfache Formel für die Anzahl der Polygonseiten n aufstellen. Da jedoch die Rolle der Zentrifugalkraft in höherem Maße unterworfen ist, werden die Sehnen AB, BD usw. (Abb. 84) nicht den Kreis

mit Radius $R - s$ (s = seitliche Abweichung der Rolle) berühren können, sondern einen Kreis mit Radius $R - s_o$, der näher der Gleismitte zu verläuft.

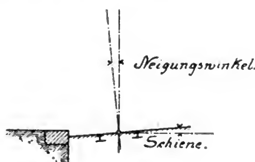


Abb. 83.



Abb. 84.

Es ist dann

$$\left(\frac{w}{2}\right)^2 = (R - s)^2 - (R - s_o)^2,$$

man findet nach kurzer Rechnung

$$n \geqq \frac{\varphi^0}{178} \cdot \sqrt{\frac{R}{s}}.$$

Bedeutet R den Kurvenradius in m, s die Abweichung der Rolle = 0,30, w die Sehnenlänge, so läßt sich folgende Tabelle aufstellen:

R	w	R	w	R	w	R	w	R	w
5	4,9	19	9,5	33	12,6	54	16,1	130	25,0
6	5,4	20	9.8	34	12,8	56	16,4	140	26,0
7	5,8	21	10,0	35	13,0	58	16,7	150	27,0
8	6,2	22	10,3	36	13,1	60	17,0	160	27,7
9	6,6	23	10,5	37	13,3	65	17,7	170	28,6
10	6,9	24	10,7	38	13,5	70	18,3	180	29,4
11	7,3	25	11,0	39	13.7	75	19,0	190	30,2
12	7,6	26	11,2	40	13,8	80	19,6	200	31,0
13	7,9	27	11,4	42	14.2	85	20,2		
14	8,2	28	11,6	44	14.5	90	20,8		
15	8,5	29	11,8	46	14,8	95	21,3		
16	8,8	30	12,0	48	15,2	100	22,0		
17	8.9	31	13,2	50	15.6	110	23,0		
18	9,3	32	12,4	52	15,8	120	24,0		

Mit Hülfe der vorstehenden Tabellen und Formeln lassen sich Kurven von beliebigem Radius ohne Mühe verspannen.

In jeder Kurve mit kleinerem Radius muß der Fahrdraht in erster Linie am Anfangspunkte der Kurve ($B\,A$ = Bogenanfang in Tafel II) und am Endpunkte der Kurve ($B\,E$ = Bogenende in Tafel II) unterstützt werden. Bei einer Gleisanordnung, wie sie in Abb. 85 gezeigt wird, sind deshalb die Punkte *a* und *b* als festliegend anzusehen. Die übrige Abspannung zwischen *a* und *b* hat sich unter Innehaltung der bereits oben angeführten Grundsätze nach der Entfernung von *a* bis *b* zu richten. Sind die Kurven nicht kurz und scharf, sondern flach und lang, so ist es nötig, die Kurve möglichst auch in der Mitte nochmals aufzuhängen, um ein allzu starkes Schwanken des Tragsystemes zu verhindern (Abb. 86).

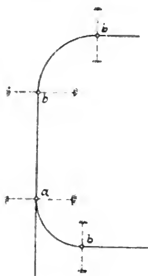
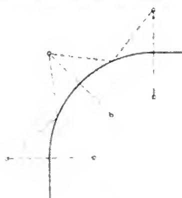
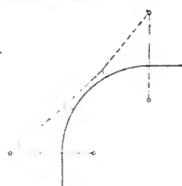
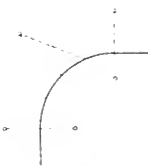


Abb. 85.

Durch die Abb. 86, 87, 88 sind einige einfache und häufig angewendete Kurvenabspannungen wiedergegeben. Es ist stets vorteilhaft, einen Isolator, der zur Aufhängung des Fahrdrahtes dient, von beiden Seiten durch einen Abspanndraht festzuhalten, wie dies in der Abb. 86 geschehen ist. Es kann in einem solchen Falle ein Verrutschen des Isolators auf dem Drahte weniger leicht eintreten, als wenn derselbe wie in Abb. 88 nur von einem Drahte abgezogen wird.


Abb. 86.


Abb. 87.


Abb. 88.

5. Die Abspannung der Luftweichen. Besondere Stützpunkte der Leitung machen sich beim Einbau einer Luftweiche (bei Rollenkontakt) nötig. Die Aufhängung der Weiche

hat derartig zu erfolgen, daß beim Befahren des Gleises in der Richtung von *a* nach *b* (Abb. 85) die Rolle durch den Wagen, noch ehe sie die Luftweiche passiert, eine Richtung erhält, durch welche das Auflaufen auf den falschen Draht unmöglich gemacht wird. Aus diesem Grunde hat es sich als vorteilhaft erwiesen, die Luftweiche dort aufzuhängen, wo die Entfernung

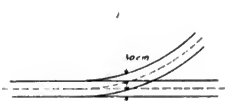


Abb. 89.

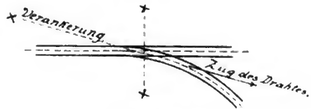


Abb. 90.

der beiden Schienenstränge etwa 30 cm beträgt (Abb. 89). Außer der Queraufhängung der Weiche ist noch eine Verankerung derselben nötig in der Weise, daß der Zug, der durch den von der Luftweiche abgehenden zweiten Fahrdraht ausge-

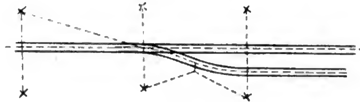


Abb. 91.

übt wird, durch diese Verankerung, wie man aus Abb. 90 ersieht, aufgehoben wird. Bei Weglassung der Verankerung würde der an der Weiche links liegende Teil des Fahrdrahtes die doppelte Spannung aufzunehmen haben, was unbedingt zu vermeiden ist.

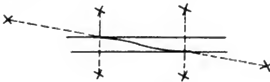


Abb. 92.

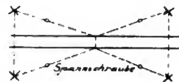


Abb. 93.

Die Abspannung der Leitungen bei Uebergang von eingleisigem in zweigleisigen Betrieb ist aus Abb. 91 ersichtlich. Die Abspannung und Verankerung eines Gleiswechsels würde nach Abb. 92 auszuführen sein.

6. Die Verankerungen. Da der Fahrdraht unter Spannung eingebaut wird, ist es nötig, denselben an verschiedenen Stellen zu verankern, um einem Rutschen desselben nach einer Seite hin vorzubeugen. Auch für die Montage der Fahrleitung sind Verankerungen insofern nötig, als man beim Spannen der Leitung einen festen Angriffspunkt besitzen muß. Verankerungen auf gerader Strecke sollen etwa alle 500 m eingebaut werden und können bei zweigleisigen Bahnanlagen die Form der Abb. 93 besitzen. Der Fahrdraht ist hier nach beiden Seiten hin verankert. Verankerungen werden ferner vorteilhaft am Anfang

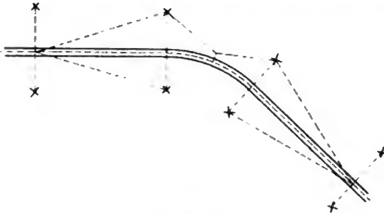


Abb. 94.

und am Ende einer Kurve eingebaut, um das Stück der Leitung, das in der Kurve liegt, vom Zuge möglichst zu entlasten. Diese Art der Verankerung zeigt Abb. 94. Um die Verankerungsdrähte tatsächlich wirksam zu machen, ist in jeden derselben eine Spannschraube eingebaut, mittels welcher der Zug in den Drähten reguliert werden kann. Eine Verankerung macht sich fernerhin nötig am Ende einer stärkeren Steigung, da durch das eigene Gewicht die Leitung einen starken Zug bergabwärts ausübt, welcher von der Verankerung aufzunehmen ist.

Einige kompliziertere Abspannungsanlagen, wie solche bei Gleisabzweigungen und Gleisüberkreuzungen auftreten, zeigen die Abb. 95 und 96. Bei der Abspannung in Abb. 95 konnte man *BA* (Bogenanfang) und *BE* (Bogenende) der Kurve örtlicher Verhältnisse halber nicht beiderseitig aufhängen, sondern nur auf der Außenseite der Kurve. Infolgedessen sind in den geringen Entfernungen von 13 bzw. 15 m von *BA* und *BE* bereits wieder Stützpunkte angeordnet. Andernfalls würden die Drähte in der Kurve zu tief hängen und zu stark schwanken.

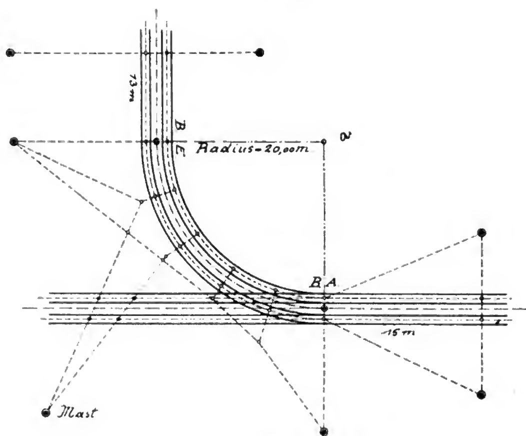


Abb. 95.

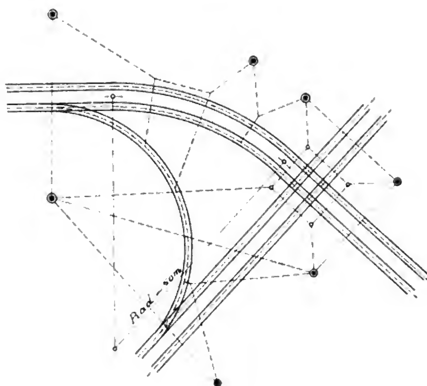


Abb. 96.

Abb. 96 zeigt die Abspannung der Oberleitung, wenn sich zwei zweigleisige Linien überkreuzen. Zugleich veranschaulicht uns die Zeichnung noch die Abspannung einer Kurve und eines Verbindungsgleises.

Bei einem Leitungszuge von maximal 500 kg würde auf gerader, horizontaler Strecke auf jeden der beiden Ankerdrähte ein Zug von 250 kg entfallen. Für diese Belastung ist der Querschnitt der Ankerdrähte zu bestimmen. Der Zug in der Fahrleitung kann noch erheblicher werden, wenn die Bahnstrecke starkes Gefälle besitzt, da in diesem Falle auch das Gewicht der Drähte zu berücksichtigen ist.

7. Die Abspannung der Streckenisolatoren. Durch Streckenisolatoren wird das gesamte Bahnnetz bekanntlich in einzelne Bezirke getheilt. Diese Streckenisolatoren werden mit einer besonderen Abspannung versehen, um die Stromkabel an den beiden Seiten des Isolators zuführen zu können. In Abb. 97 soll *i* diesen Isolator vorstellen. Vor und hinter dem Isolator, also bei *a* und *b*, werden isolierte Kabel befestigt, welche zu dem Ausschalter *A* führen. Bei eingeschaltetem Ausschalter *A* nimmt der Strom, von links kommend, den durch Pfeile gekennzeichneten Weg, während bei geöffnetem *A* die Strecke *bc* stromlos gemacht wird. Bei dem Einbau eines Streckenisolators ist zu beachten, daß derselbe möglichst vom Zuge, der in der Leitung herrscht, entlastet wird. Dies geschieht durch eine geeignete Verankerung der Leitung an dieser Stelle nach beiden Seiten hin. Die Verankerungsdrähte werden gleichzeitig zur Befestigung der Stromkabel *aA* und *bA* benutzt. In Abb. 98 ist eine Verankerung erwähnter Art ausgeführt. *a* sind die Spanndrähte, welche die Isolatoren *i* vom Leitungszug entlasten und gleichzeitig die Kabel *b* tragen, die einerseits mit dem Ausschalter *A*, andererseits durch geeignete Klemmen mit der Fahrleitung in Verbindung stehen.



Abb. 97.

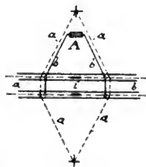


Abb. 98.

Den Ausschalter *A*, der sich in einem wasserdichten Kasten befindet, befestigt man gewöhnlich etwa in Manneshöhe an einem Maste. In Gasrohren kann man die Kabel am Maste emporführen, worauf sie die oben gebogenen Rohre verlassen

und unter Zwischenschaltung kleiner Porzellanrollen an den Spanndrähten festgebunden werden und an die Leitungsdrähte sich anschließen.

Die Masten. Die in elektrischen Bahnbetrieben angewendeten Masten sind

Holzmasten,
Röhrenmasten,
Gittermasten.

Während die Holzmasten bei längeren Bahnlinien (Ueberlandbahnen) mit eigenem Bahnkörper häufig Anwendung finden, werden für elektrische Straßenbahnen innerhalb größerer Ortschaften fast ausschließlich die eisernen Rohr- und Gittermasten verwendet.

Der Berechnung eines Mastes ist zugrunde zu legen:
bei eisernen Masten eine mindestens fünffache Sicherheit,
bei hölzernen Masten eine mindestens zehnfache Sicherheit.

Dient ein Mast zur Abspannung einer Kurve, so gehen von ihm häufig mehrere Drähte aus; mit Hülfe des Kräfteparallelogrammes kann auf graphischem Wege die Kräfteresultante bestimmt werden. Die Zugspannungen in den Kurvenabspanndrähten können Werte von 100 bis 200 kg pro Draht annehmen. Da bekanntlich das Biegungsmoment nach der Spitze des Mastes zu abnimmt, werden fast stets die Masten nach oben verjüngt. Bei der Bestimmung des Durchmessers eines Mastes ist zu berechnen:

1. Der Winddruck p_m auf den Mast. Man nimmt an, daß der Winddruck in der Mitte des Mastes angreift. Bei rundem Querschnitt ist zu beachten, daß der Winddruck auf eine zylindrische Fläche gleich zu setzen ist dem Winddruck auf $\frac{2}{3}$ der Projektion der Zylinderfläche, also

$$\text{Winddruck } p_m = \frac{2}{3} l \cdot d \cdot p_1,$$

worin
l = Länge des Mastes in m,
d = Durchmesser des Mastes in cm,
p_1 = Winddruck in kg/m²
bedeutet.

Erfahrungsgemäß beträgt p_1 im Maximum 100 kg.

2. Das elementare Biegungsmoment M_1. Dasselbe wird hervorgerufen durch den Winddruck p_m auf den Mast

und ergibt sich bei einer Höhe h des Mastes über Erdoberfläche zu

$$M_1 = p_m \cdot \frac{h}{2} \text{ cmkg.}$$

3. Das absolute Biegungsmoment M_2. Das absolute Biegungsmoment, wirksam am Ende des Mastes, ergibt sich zu

$$M_2 = R \cdot h \text{ cmkg,}$$

worin R die Resultante der verschiedenen am Mastkopf wirkenden Kräfte bezeichnet.

4. Das maximale Biegungsmoment M_{max}. Das maximale Biegungsmoment wird gebildet durch die Summe des elementaren und absoluten Biegungsmomentes, also

$$M_{max} = M_1 + M_2.$$

5. Das Widerstandsmoment W. Bekanntlich ist

$$M_{max} = K \cdot W,$$

worin K die zulässige Biegungsbeanspruchung des Materials und W das Widerstandsmoment bedeutet.

Aus dieser Formel kann der Querschnitt des Mastes berechnet werden.

Beispiel. Zur Endabspannung des Fahrdrahtes einer elektrischen Bahn seien zwei Gittermasten verwendet. Die Spannung pro Mast betrage 400 kg. Wie sind die Masten zu dimensionieren, wenn der Befestigungspunkt der Leitung sich 7,0 m über dem Erdboden befindet?

Es soll ein eiserner Gittermast, bestehend aus vier L-Eisen, die durch Flacheisen miteinander verbunden sind, zur Verwendung kommen.

Am Fuße sei der Mast 340 mm, am Kopfe 120 mm breit. Es fragt sich nun, ob diese Dimensionen genügen, um bei einem bestimmten Profil des L-Eisens den Beanspruchungen durch Zug und Winddruck Stand zu halten.

Die Winddruckfläche des Mastes besitzt etwa die Größe 1,5 m^2. Bei einem maximalen Winddruck von 100 kg m^2 berechnet sich der Winddruck zu

$$p_m = 1{,}5 \cdot 100 = 150 \text{ kg.}$$

Das elementare Biegungsmoment M_1 ergibt sich zu:

$$M_1 = p_m \cdot \frac{h}{2} = 150 \cdot \frac{700}{2} = 52500 \text{ cmkg.}$$

Das absolute Biegungsmoment M_2 ergibt sich zu:

$$M_2 = R \cdot h = 400 \cdot 700 = 280\,000 \text{ cmkg}.$$

Das maximale Biegungsmoment wird somit:

$$M_{max} = M_1 + M_2 = 52\,500 + 280\,000 = 332\,500 \text{ cmkg}.$$

Nun ist das Widerstandsmoment:

$$W = \frac{M_{max}}{K}.$$

Wählt man für K den Wert von 1000 kg|cm², so erhält man:

$$W = \frac{332\,500}{1000} = 332{,}5 \text{ cm}^3.$$

Dieses Widerstandsmoment muß der Gittermast wenigstens besitzen. Abb. 99 stellt den Querschnitt des Mastes am Fuße dar. Das Widerstandsmoment dieses Querschnitt berechnet sich zu:



Abb. 99.

$$W = \frac{J}{e},$$

worin J das Trägheitsmoment und e den Abstand der entferntesten gezogenen bzw. gedrückten Faser in cm bedeutet.

Ist die Breite a des Mastes 34 cm, also $\frac{a}{2} = 17$ cm, so ist bei Anwendung des L-Eisens $60 \times 60 \times 6$

$$e = 17 \text{ cm}.$$

Nun ist bekanntlich: Trägheitsmoment

$$J = 4 \cdot (J_0 + F \cdot e_1^2),$$

wenn J_0 das Trägheitsmoment bezogen auf den Schwerpunkt eines der L-Eisen, F die Fläche des L-Eisens und e_1 die Entfernung der Achse des Mastes von der Schwerpunktsachse des L-Eisens bedeuten, somit wird:

$$J = 4\,(23{,}4 + 234 \cdot 6{,}84) = 6496 \text{ cm}^4,$$

infolgedessen:

$$W = \frac{J}{e} = \frac{6496}{17} = 382 \text{ cm}^3.$$

Dieses Widerstandsmoment ist größer als das oben berechnete, d. h. die Anwendung des L-Eisens Profil 6 ist zulässig.

Unter Umständen findet man auch mehr oder weniger verzierte Rundmasten (Rohrmasten) aus Schmiedeeisen oder auch Gittermasten aus ⊏-Eisen für Bahnzwecke verwendet. Die Berechnung solcher Mastentypen hat selbstverständlich unter denselben Gesichtspunkten zu erfolgen.

Außer auf Biegung ist jeder Mast auch auf genügende tiefe **Versenkung im Erdboden** zu berechnen. Die Bestimmung der Größe der Versenkung kann auf folgende Weise geschehen.

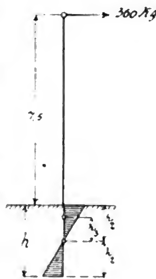


Abb. 100.

Der Druck auf das Erdreich soll 2,5 bis 3 kg/cm² betragen (Abb. 100). Der Drehpunkt D des Mastes wird in der Mitte des versenkten Maststückes angenommen. Der Erddruck nimmt deshalb von D aus nach oben und unten hin proportional mit dem Abstand von D zu.

Bei einem Durchmesser eines runden Mastes von z. B. 29 cm beträgt demnach der gesamte Erddruck:

$$P = (29 \cdot \frac{h}{2} \cdot 2{,}5) = \sim 36\, h.$$

Das Moment M_ε des Erddruckes ist:

$$M_\varepsilon = P \cdot \frac{h}{3} \cdot 2 = 36\, h \cdot \frac{h}{3} \cdot 2 = 24\, h^2.$$

Das Moment M_{max} außen am Mastkopfe beträgt bei einer Beanspruchung von $R = 360$ kg und einem Winddrucke von $p_m = 225$ kg:

$$M_{max} = 360 \cdot \left(750 + \frac{h}{2}\right) + 225 \left(375 + \frac{h}{2}\right).$$

Soll der Mast nun nicht kippen, sondern soll zwischen den einzelnen Kräftewirkungen Gleichgewicht herrschen, so muß sein:

$$M_\varepsilon = M_{max},$$

d. h.:

$$24\, h^2 = 360 \left(750 + \frac{h}{2}\right) + 225 \left(375 + \frac{h}{2}\right),$$

hieraus folgt:

$$h = \sim 130 \text{ cm}.$$

Der Mast würde also etwa 1,50 m tief in den Boden einzusetzen sein. Die Masten schwächerer Type werden etwa

1,5 m tief in den Erdboden gesetzt. Unten an der Hinterseite des Mastfußes und oben an der Vorderseite des Fußes wird ein festes Widerlager von Bruchsteinen gebildet. Die Masten stärkerer Type, welche zur Aufnahme mehrerer Spanndrähte benutzt werden, umgibt man am besten mit einem Betonklotz, wodurch dem Verziehen am wirksamsten vorgebeugt wird. Die Versenkungstiefe dieser Masten beträgt etwa 2,0 m. Die Betonmischung besteht aus Klarschlag, Sand und Zement etwa im Verhältnis 7 : 3 : 1 und wird unter Anwässerung gehörig festgestampft. Der Betonklotz muß wenigstens bis zu drei Viertel der Höhe des Mastfußes emporreichen. Der örtliche Stand der Masten richtet sich meistens nach den behördlichen Vorschriften; einmal stehen die Masten an der Hinterkante des Fußweges, das andere Mal am Wegrand. Bisweilen werden sie dicht hinter den Bordstein gesetzt, besonders wenn Bäume und Laternen diese Stellung einnehmen. Infolgedessen macht sich ein Ausarbeiten des Bordsteines erforderlich (Abb. 101). Um zwischen einem Rundmast und dem Bordstein einen passenden Anschluß zu bilden, umgibt man den Rundmast häufig noch mit einem sogen. gußeisernen Bordsteinkasten (Abb. 33).

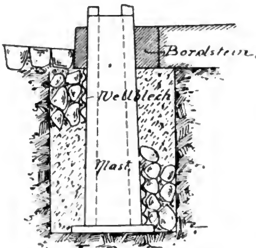


Abb. 101.

Die Schutzvorrichtungen für elektrische Bahnen.

1. Blitzableiter. Gegen Blitzschläge werden die Leitungen durch Blitzableiter nach Möglichkeit gesichert. Dieselben bilden für elektrisch betriebene Fahrzeuge eine unbedingte Notwendigkeit, da außer den Apparaten und Motoren der Wagen auch die Passagiere den Gefahren der atmosphärischen Entladung in die Zuleitungen der Bahn ausgesetzt sein würden.

Bei Bahnanlagen können die verschiedensten Systeme von Blitzschutzeinrichtungen in Anwendung kommen. Man findet elektromagnetische Blitzableiter, Blitzableiter mit elektromagnetischer Funkenlöschung und besonders bei Hochspannungsanlagen Hörnerblitzableiter.

Aus Abb. 102 folgt die Wirkung eines elektromagnetischen Blitzableiters. Wenn der Blitz zwischen den beiden Platten *a* und *b* übergeht, entsteht infolge des sich bildenden Lichtbogens Erdschluß, so daß der Betriebsstrom der Zentrale den Blitzableiter durchfließt. Infolgedessen wird die Magnetspule *e* erregt und zieht die Platte *a* nach oben, bis der Lichtbogen abreißt. Sind die Platten nicht beschädigt, so ist hiernach der Blitzableiter zu einer neuen Entladung bereit.

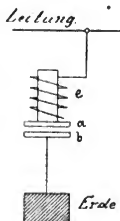


Abb. 102.

Diese Art der Blitzableiter besitzen den Nachteil beweglicher Teile, wodurch ihre Funktion leicht in Frage gestellt wird. Diese Nachteile werden umgangen bei dem Spulenblitzableiter von Siemens und Halske, dessen Schaltung Abb. 103 zeigt. Dieser Ableiter hat zwei hintereinander geschaltete Funkenstrecken, die zwischen drei Metallstücken gebildet werden. Parallel zu einer der Funkenstrecken ist ein Elektromagnet *c* geschaltet, so daß beide Funkenstrecken in einem kräftigen magnetischen Felde liegen. Während nun der Blitz über die drei Metallkontakte und die beiden Funkenstrecken zur Erde abfließt, wird der nachfolgende Maschinenstrom teilweise den Magneten *e* passieren. Infolgedessen bläst das dadurch entstehende magnetische Feld den Lichtbogen in beiden Funkenstrecken aus und unterbricht den Maschinenstrom.

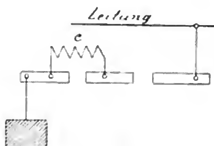


Abb. 103.

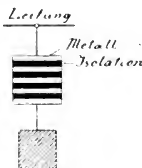


Abb. 104.

Abb. 104 stellt eine Anordnung dar, bei welcher der Blitz nur kurze Widerstände zu überspringen hat, indem in wechselnder Folge Platten aus Metall und Isolierstoff aufgeschichtet sind. Der Blitz zerteilt sich infolgedessen in kleine einzelne Funken, die bald verlöschen. Dagegen genügt die Stärke der Isolationsplatten, den Betriebsstrom von der Erde abzusperren.

Ausgedehnte Anwendung zur Sicherung von Leitungen hat der Hörnerblitzableiter gefunden, der sowohl für Gleichstrom als auch für Wechselstrom gleich gut benutzt werden kann. Der Ableiter besteht aus zwei Metallhörnern (Abb. 105), deren Entfernung sich nach oben hin vergrößert. Der Zwischenraum wird vom Blitz übersprungen. Der nachfolgende Maschinenstrom wird durch die elektrodynamische Wirkung des Stromes und durch den aufsteigenden Luftstrom zum Wandern nach oben und baldigem Abreißen gebracht. In den meisten Fällen schaltet man zwischen den Blitzableiter und den Motor eine Drosselspule ein, durch deren Selbstinduktion dem Blitz ein bedeutender Widerstand entgegengesetzt wird, so daß derselbe den für ihn bequemeren Weg über die Funkenstrecke zur Erde nehmen wird.

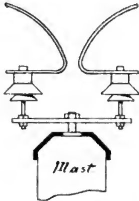


Abb. 105.

Auch der Hörnerblitzableiter ist von der A. E.-G. mit einer magnetischen Funkenlöschung versehen worden (Abb. 106). Der Betriebsstrom umfließt in einigen Windungen einen lamellierten Eisenkörper *e*, wodurch ein magnetisches Feld in angedeuteter Weise entsteht. Infolgedessen wird der Funke zwischen den Bügeln nach oben getrieben und rasch verlöscht. Bei diesem Blitzableiter erübrigt sich auch die Anbringung einer Drosselspule, da diese bereits durch die Drahtwindungen auf dem Eisenkörper *e* gebildet ist.

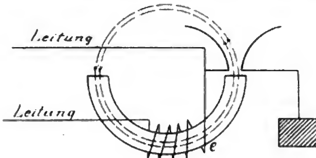


Abb. 106.

Bei elektrischen Bahnen empfiehlt es sich, auf der Strecke Blitzschutzvorrichtungen in Abständen von etwa 500 m anzubringen. Außerdem müssen selbstverständlich die Speiseleitungen an ihrer Anschlußstelle an die Stromleitungen durch einen Blitzableiter geschützt sein. Die kupferne Erdplatte des Blitzableiters ist in das Grundwasser zu legen. Ist es nicht möglich, das Grundwasser zu erreichen, so ist es ratsam, die Platten in Koks zu betten.

2. **Schwachstromleitungsschutz.** Sämtliche Telephon- und Telegraphenleitungen müssen, sobald dieselben mit den Starkstromleitungen elektrischer Bahnen auf längere Strecke parallel laufen, von letzteren einen bestimmten von den Behörden vorgeschriebenen Abstand besitzen. Es müssen deshalb häufig die Schwachstromleitungen verlegt werden, was mit nicht unwesentlichen Kosten verbunden ist. Die mit der Kontaktleitung einer Bahn parallel laufenden Schwachstromleitungen



Abb. 107.



Abb. 108.



Abb. 109.

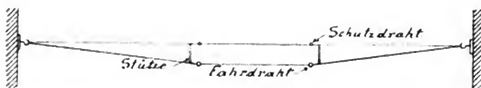


Abb. 110.

können vor gegenseitiger Berührung durch Drahthaken geschützt werden, welche auf die Querspanndrähte aufgesetzt sind (Abb. 107). Ferner versucht man durch das Aufbringen isolierter Schutzleisten oder Stäbe einen Stromübergang aus der Starkstromleitung zu verhindern. Die Schutzleisten bestehen aus Holz (Abb. 108), Bambusrohr oder Gummi (Abb. 109). Letzterer findet zweckmäßig dann als Schwachstromschutz Verwendung, wenn die immer mehr bei Bahnen in Aufnahme kommenden Profildrähte zum Einbau gelangen. Ein wirksamer Schutz für Schwachstromleitungen besteht in der Anbringung besonderer isolierter Schutzdrähte, die in kurzer Entfernung oberhalb der Fahrleitungen gespannt sind (Abb. 110). Sie verhindern, daß herabfallende Drähte mit den Fahrleitungen in Berührung kommen.

Das Oberleitungsmaterial. Die Befestigung des Fahrdrahtes an den Isolatoren erfolgt durch Festklemmen zwischen Klemmbacken oder durch Lötung. Der ersteren Befestigungsweise wird meistens der Vorzug gegeben, da sie einfacher in der Ausführung ist, keine Veränderung der Qualität des Fahrdrahtes durch Erwärmung beim Löten verursacht und eine leichte Demontage ermöglicht. Die bei oberirdischen Bahnleitungen auftretenden äußeren Zugkräfte, die verschiedentlichen Witterungseinflüsse, die Beanspruchung der Leitungen durch Stöße und Schläge, durch entgleiste Stromabnehmer und anderes mehr bedingen eine vorzügliche Konstruktion der Tragisolatoren. Aus denselben Gründen begnügt man sich nicht mit einer einfachen Isolation der Fahrdrähte, sondern wendet deren zwei und bei Befestigung der Querspanndrähte an Häusermauern sogar deren drei an verschiedenen Stellen an. Eine wichtige Rolle bei der Konstruktion der Isolierstücke spielt deren Isolationsmaterial. Dasselbe muß nach verschiedenen Seiten hin vorzügliche Eigenschaften aufweisen, da es einmal die mechanische Festigkeit des Isolators nicht beeinträchtigen darf, andererseits aber auch allen Witterungseinflüssen wie Hitze, Kälte, Regen, Frost vollkommen gewachsen sein muß ohne an Isolationsfähigkeit zu verlieren. Einige der verwendeten Isolationsstoffe sind z. B. Ambroin, Hartgummi, Stabilit, Vulkanfiber, Eburin, Granit.

Sämtliche Isolatoren könnte man einteilen in:

1. Isolatoren, welche den Fahrdraht halten (Fahrdrahtisolatoren, Arbeitsisolatoren),
2. Isolatoren, welche zur Abspannung der Querdrähte dienen (Spannisolatoren, Spannschrauben),
3. Isolatoren, welche den Fahrdraht am Ende der Bahnstrecke halten (Endisolatoren, Endmuffen und Spannisolator),
4. Isolatoren, welche den Fahrdraht unterbrechen (Isoliermuffen).

1. Fahrdrahtisolatoren. Einen Fahrdrahtisolator der A. E.-G. (sogen. Arbeitsisolator) zeigt Abb. 111. Ein Stahlbolzen *s* ist mit einer Isoliermasse *i* (Stabilit) umgeben, welche in ein konisch geformtes Metallgehäuse *m* (Rotguß) eingefügt wird. Der Stahlbolzen ist an seinem oberen Ende gestaucht, damit er auch bei etwaigem Zerspringen des Stabilitkonus nicht herausfallen kann. Der Stabilitkegel mit dem Stahlbolzen wird

von oben in das Gehäuse eingeschoben und letzteres durch eine Blechkappe mittels Schrauben verschlossen. Es ist somit möglich, etwaige defekte Isolierkegel bei bereits eingebauten Isolatoren aus dem Gehäuse zu entfernen und durch einen neuen zu ersetzen. Aehnlich wie die Glocken der gewöhnlichen Porzellanisolatoren hat das Gehäuse nach unten eine schirmartige Erweiterung, um das Regenwasser abtropfen zu lassen. An dem untern Teile des Stahlbolzens befinden sich die Klemmenbacken für den Fahrdraht. Je nach der Verwendung ist das Gehäuse dieses Isolators mit Armen versehen, welche die Spanndrähte aufnehmen. Um den Isolator am Querdrahte anzubringen wird letzterer nicht zerschnitten, sondern in denselben eingehängt und sodann straff gespannt, wodurch sich die Montage zu einer höchst einfachen gestaltet. Bei Anwendung des Isolators für Kurvenabspannungen sind die Befestigungsarme beweglich angebracht, so daß sich dieselben, den jeweiligen Zugrichtungen folgend, so einstellen, daß der Fahrdraht selbst nicht schief gezogen wird.

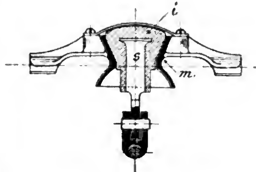


Abb. 111.

2. Spannisolatoren. Prinzipiell weisen diese Isolatoren denselben Aufbau auf wie die unter 1. beschriebenen Isolatoren. In Abb. 112 ist eine Spannschraube der A. E.-G. dargestellt. Auch hier ist ein Metallbolzen *s* umpreßt von einer Stabilit-

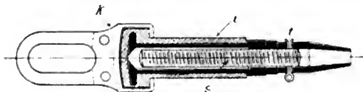


Abb. 112.

hülse *i*, welche ihrerseits von der Metallkapsel *K* (bestehend aus zwei durch Schrauben miteinander verbundenen Hälften) gehalten wird. Im Stahlbolzen *s* befindet sich eine Schraubenspindel, auf deren äußeres Ende ein zu einer Mutter ausgebildeter Metallkonus aufgeschraubt wird, der den Spanndraht trägt. Man kann somit auf die Länge der Schraubenspindel

den Querdraht verkürzen oder verlängern. Durch einen Splint *t* ist der Metallkonus gesichert. Die Befestigung des Querdrahtes in der Spannschraube geschieht unter Benutzung eines Klemmkegels in derselben Weise wie die Befestigung der Speiseleitungen an den Schienen der Kabelkästen. Durch ein zwischen das Gehäuse *K* und den Stahlbolzen *s* eingelegtes Gummipolster kann das Geräusch, das in Gebäuden infolge des Befahrens der Leitung durch die Stromabnehmer auftritt, wesentlich gedämpft werden.

Während der Fahrdrahtisolator und der Spannisolator die Oberleitung zweimal gegen Erde isolieren, wird bei der Befestigung der Spanndrähte an den Häusern ein dritter Isolator von ähnlicher Konstruktion wie die Spannschrauben in den Querdraht eingebaut.

3. Endisolatoren. Die Spannschrauben, die den Fahrdraht am Ende der Strecke zu halten haben, sind ähnlicher Konstruktion wie die einfachen Spannschrauben der Querdrähte. Der Fahrdraht wird zur sicheren Befestigung in dem konischen Teile der Spannschraube am Ende breit geschlagen und übereinander gebogen, so daß das Drahtende eine konische Gestalt erhält (Abb. 113) und bei Anzug der Leitung sich in der konischen Hülse festklemmt.



Abb. 113.

4. Isoliermuffen. Eine ebenfalls von der A. E.-G. hergestellte Isoliermuffe zeigt Abb. 114. Dieselbe besteht aus einer von einer Stabilithülse *i* umgebenen Spindel *s* mit zwei Muttern. Zwischen den beiden Metallteilen *m*

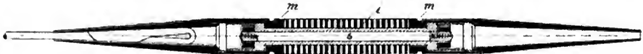


Abb. 114.

der Muffe sind auf die Stabililhülse abwechselnd Mikanit- und Aluminiumscheiben aufgeschoben und fest zusammengepreßt. An den äußeren Enden der Metallteile *m* ist Gewinde eingeschnitten, um die konischen Metallhülsen *n* mit den Enden der Fahrleitung aufzunehmen. Diese Isoliermuffe besitzt den Vorteil einer selbsttätigen Funkenlöschung, denn wenn sich

zwischen dem Stromabnehmer und den Metallteilen *m* ein Unterbrechungsfunke bildet, so wird derselbe von einer Aluminiumscheibe zur anderen mit immer abnehmender Stärke springen und etwa in der Mitte der Muffe verlöschen.

Außer diesen Isoliermuffen müssen bei einer Bahnanlage noch Spannmuffen für den Fahrdraht vorhanden sein, mit deren Hülfe der Durchhang der Leitung reguliert werden kann. Die Spannung in den Verankerungsdrähten der Leitung muß durch besondere Spannschrauben ausgeglichen werden. Bei Anwendung des Rollenkontaktes macht sich ferner der Einbau von Luftweichen, Kreuzungen usw. nötig, auf deren Konstruktion hier nicht eingegangen werden soll.

Stromzuführung durch dritte Schiene. Die Stromzuführung durch Rolle oder Bügel kann sich bei Gleichstrombahnen nur bewähren, wenn die Fahrgeschwindigkeiten und Stromstärken nicht zu hoch sind. Bei Geschwindigkeiten von 100 km und mehr und ferner bei Stromstärken von einigen 100 Ampère versagen Rolle und Bügel den Dienst, da die Berührungsfläche zwischen Stromabnehmer und Leitung für derartige Stromstärken zu klein ist. In solchen Fällen hat man zweckmäßig die Stromzufuhr mit dritter Schiene verwendet. Allerdings bedingt dieselbe einen eigenen geschützten Bahnkörper, der aber in den meisten Fällen bei Bahnen mit höheren Geschwindigkeiten vorhanden sein wird. Auf der Stromzuführungsschiene, die in mäßiger Höhe über dem Erdboden angebracht ist, schleifen ein oder mehrere Gleitschuhe, die den Strom den Motoren zuführen. In Abb. 115 ist der Einbau der dritten Schiene der Vorortbahn Berlin-Großlichterfelde-Ost wiedergegeben.*) Auf einem eisernen Arm, der auf der Schwelle der Fahrschienen befestigt ist, ruht unter Zwischenschaltung eines isolierenden Granitstückes die Schiene. Die Isolatoren der dritten Schiene finden sich in Abständen von 2 bis 3 m. Um Personen vor einer zufälligen Berührung mit der stromführenden Schiene zu schützen, sind zu beiden Seiten derselben Schutzbretter angebracht, die durch Holzklötze in richtigem Abstand von der Schiene gehalten werden. Die einzelnen Schienen dieser Bahn besitzen eine Länge von 15 m und sind untereinander nach dem aluminothermischen Verfahren von Goldschmidt verschweißt. Allerdings wird nach jeder dritten Schiene diese Verbindung ersetzt

*) *Zeitschr. des Vereins Deutsch. Ing. 1903.*

durch eine gewöhnliche Laschenverbindung, um die unausbleiblichen Längenveränderungen des Schienenstranges zu berücksichtigen. In Abständen von je 1 km sind die dritten Schienen durch einen Rahmen aus Holzbalken verankert (Abb. 116).

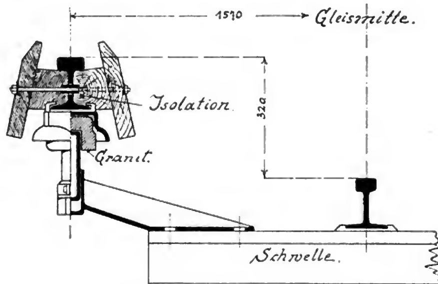


Abb. 115.

Der Stahl der stromzuführenden Schiene enthält nur geringe Kohlenstoff- und Manganmengen. Die dritte Schiene der erwähnten Bahn ist mit Speiseleitungen versehen und in einzelne voneinander unabhängige Teile getrennt. Diese Streckenisolatoren werden gebildet durch ein kurzes stromloses Schienenstück (Abb. 117), so daß der Strom gezwungen ist, seinen Weg durch den Ausschalter zu nehmen. Zu beiden Seiten der stromlosen Schiene sind an den Strom führenden Schienenenden Blitzableiter

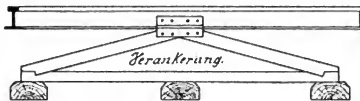


Abb. 116.

angebracht. Um zu verhindern, daß durch die Streckenisolatoren der Strom zeitweilig unterbrochen wird, befinden sich am Wagen zwei Gleitschuhe, so daß stets einer der Schuhe mit einer stromführenden Schiene in Berührung ist.

An dieser Stelle sei einiges über die Steuerung der Motoren mehrerer Motorwagen, die zu einem Zuge vereinigt werden, gesagt. Eine solche Zusammenstellung der Wagen findet sich z. B. bei größeren Vorortbahnen wie die erwähnte Bahn Berlin–Großlichterfelde-Ost. Die Schaltwalzen sind an eine den ganzen

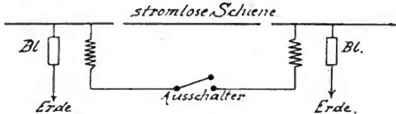


Abb. 117.

Zug durchsetzende Schaltleitung angeschlossen und werden von einem verhältnismäßig schwachen Strome durchflossen. Ueber die Kontakte der Schaltwalze werden zylindrische Drahtspulen, sog. Schützen, die vom Strome durchflossene Eisenkerne anziehen, betätigt (Abb. 118). Die Schützen ihrerseits schließen

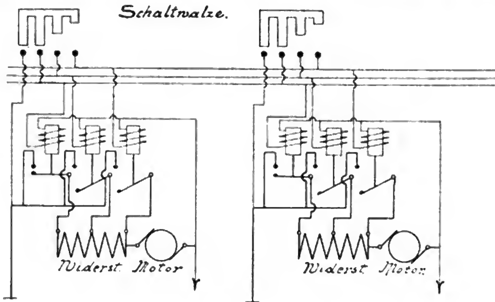


Abb. 118.

Kontakte, über welche der Betriebsstrom event. durch Widerstände zum Motor des Wagens gelangt. Der Vorteil einer solchen Zugsteuerung liegt in der Möglichkeit, von jedem Wagen aus die Steuerung bewerkstelligen zu können und in der geringen Stromstärke, welche die Schaltwalzen durchfließt. Dieselben

können deshalb in ihrer Konstruktion verhältnismäßig klein und einfach ausgebildet werden. Bei Anwendung mehrerer Motoren in einem Wagen macht sich selbstverständlich eine größere Zahl Schützen und Walzenkontakte erforderlich, so daß die Schaltung komplizierter ausfällt.

b) Das unterirdische Stromzuführungssystem.

Das System der unterirdischen Stromzuführung hat sich, obwohl eine große Anzahl Konstruktionen dieses Systemes existieren, im allgemeinen wenig bewährt und besitzt deshalb nur geringe Verbreitung. Die hohen Anlagekosten solcher Stromzuführungssysteme, mögen sie als Schlitzkanal oder Teilleiter ausgeführt sein, die nötige sorgfältige Ueberwachung, die Betriebsunsicherheit bei Regen, Schnee und Frost sind schwerwiegende Gründe, die gegen eine durchgängige Einführung dieses Systemes sprechen. Jedenfalls werden die geringen Vorteile, die im Wegfallen der Oberleitung mit dem gesamten Tragwerk bestehen, kaum die Nachteile aufwiegen. Zweckmäßig kann sich mitunter eine Verwendung der unterirdischen Stromzufuhr auf kurzen Strecken der gesamten Bahnanlage erweisen, wenn bestimmte Straßen oder Plätze einer Großstadt durch Oberleitungsteile nicht verunziert werden sollen. In solchen Fällen sind die Motorwagen mit zwei leicht auswechselbaren Stromabnehmern zu versehen.

Die auf Seite 108 unter c) und d) erwähnten Stromzuführungsarten bei Benutzung von Akkumulatoren gestalten sich der Natur der Sache nach einfach. Die im Wagen mitgeführten Akkumulatoren, die zeitweilig zur Stromlieferung herangezogen werden, können während der Fahrt aus der Oberleitung oder aber auch an den Endstellen während der Aufenthalte durch besondere Ladevorrichtungen aufgeladen werden.

VIII. Abschnitt.

Die elektrischen Automobilen.

1. Die elektrische Ausrüstung von Automobilen mit Akkumulatorenbetrieb. Bei dem Bau elektrischer Automobilen ist selbstverständlich die größte Sorgfalt auf die Wahl einer geeigneten Akkumulatorenbatterie zu legen. Die Erfahrungen, die man im Laufe der Jahre gemacht hat, lassen die Verwendung der sog. Massenplatten als nicht so geeignet erscheinen wie die der Großoberflächenplatten, da die ersteren Batterien sich als zu schwer und unrationell erwiesen. Die für Traktion zu verwendenden Akkumulatoren müssen entsprechend ihrem Zwecke und entsprechend den ungünstigen Verhältnissen, unter denen sie im allgemeinen arbeiten, sehr haltbar sein, hohe Kapazität bei möglichst kleinem Gewichte besitzen und hohe Lade- und Entladestromstärke vertragen, so daß dieselben bis etwa 15 Ampère pro dm^2 gesteigert werden können. Ferner müssen die Batterien auch in konstruktiver Hinsicht hohen Ansprüchen genügen. Sie dürfen nur geringen Raum in Anspruch nehmen, müssen leicht zugänglich sein und leicht zu lösende Verbindungen besitzen, so daß eine Verlötung der einzelnen Zellen untereinander möglichst vermieden wird. Als Gefäße für die Akkumulatoren können solche aus Holz mit Bleiausschlag oder auch solche aus Hartgummi, die leichter sind als erstere, Verwendung finden.

Aus folgender Tabelle ersieht man die Leistung der Akkumulatoren für elektrische Automobilen der Kölner Akkumulatoren-Werke Gottfried Hagen. Die Zellen weisen eine hohe Entladestromstärke im Verhältnis zu ihrem Gewicht auf und können momentan mit einer sehr hohen Stromstärke, wie solche bei der Anfahrt eines Wagens auftritt, belastet werden.

Abgesehen von den wenigen elektrischen Straßenbahnen, die mit Akkumulatorenbatterien zu arbeiten haben, wird die Spannung, mit der die Motoren laufen, niedrig sein, um für die Batterie möglichst wenig Raum beanspruchen zu müssen. Bei kleineren Wagen beträgt die Zellenzahl meist etwa 40, bei größeren Wagen 80, woraus eine mittlere Entladespannung von 75 bzw. 150 Volt folgt.

Type W		3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	Type W extra 4	8	12	16
Strom in Amp. bei Entladung während	3 Stunden	13,5	18	22,5	27	31,5	36	40,5	45	54	63	72	81	90	27	54	81	108
	4 „	11,25	15	18,75	22,5	26,25	30	33,75	37,5	45	52,5	60	67,5	75	21,5	43	64	86
	5 Stunden	9,6	12,8	16	19,2	22,4	25,6	28,8	32	38,4	44,8	51,2	57,6	64	18,5	37	55,5	74
	7 Stunden	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22.5	25	30	35	40	45	50	14	28	42	56
	10 „	5,7	7,6	9,5	11,4	13,3	15,2	17,1	19	22,8	26,6	30,4	34,2	38	10	20	30	40
	*1 Stunde	28.5	38	47,5	57	66,5	76	85,5	95	114	133	152	171	190	50	100	150	200
	*2 Stunden	18	24	30	36	42	48	54	60	72	83	96	108	120	35	70	105	140
Kapazität in Amp.-Stunden bei Entladung während	3 Stunden	40,5	54	67,5	81	94,5	108	121.5	135	162	189	216	243	270	81	162	243	324
	4 „	45	60	75	90	105	120	135	150	180	210	240	270	300	86	172	258	344
	5 Stunden	48	64	80	96	112	128	144	160	192	224	256	288	320	92,5	185	277	370
	7 Stunden	52,5	70	87,5	105	122,5	140	157,5	175	210	245	280	315	350	98	196	294	392
	10 „	57	76	95	114	133	152	171	190	228	266	304	342	380	100	200	300	400
	*1 Stunde	28,5	38	47,5	57	66,5	76	85,5	95	114	133	152	171	190	50	100	150	200
	*2 Stunden	36	48	60	72	84	96	108	120	144	168	192	216	240	70	140	210	280
Ladestromstärke		9	12	15	18	21	24	27	30	36	42	48	54	60	15	30	45	60
Gewicht pro Zelle kompl.		5	6,5	8	10	11,5	13	14,5	16	19	22	25	28	31	6,5	13	19	25
„ von 44 Zellen		220	286	352	440	506	572	638	704	836	968	1100	1232	1364	286	572	836	1100

*) Nur für stoßweise Beanspruchung zulässig.

Die Größe der Batteriezellen richtet sich nach dem Kraftbedarf der Motoren und der ohne Nachladung zurückzulegenden Strecke. Versuche der Siemens-Schuckert-Werke haben ergeben, daß der Effektbedarf eines Wagens auf ebener Strecke bei guter Beschaffenheit des Weges 75 bis 100 Wattstunden pro Tonne Gewicht und Kilometer beträgt. Bei schlechten Wegeverhältnissen kann sich der Effektbedarf noch bedeutend höher stellen. Der Traktionskoeffizient hat bei gutem Pflaster Werte von 15 bis 20, bei schlechten Straßen 20 bis 30 kg pro Tonne.

Der Antrieb eines Wagens kann erfolgen, indem ein Wagenrad durch einen Motor angetrieben wird. In diesem Falle ist die Ausnutzung des Adhäsionsgewichtes keine günstige. Zum Anlassen des Motors und zur Regulierung der Geschwindigkeit dienen Fahrschalter ähnlich den bei Straßenbahnwagen verwendeten. Dieselben werden sowohl mit Kurbel als auch mit Hebel angeordnet, so daß sie am Boden des Wagens liegend bequem bedient werden können. Die Regulierung der Geschwindigkeit geschieht durch Teilung der Batterie in zwei gleiche Teile unter gleichzeitiger Benutzung eines Vorschaltwiderstandes. Als Nebenapparate kommen für einen Automobilwagen noch in Frage:

- Ein Strom- und Spannungsmesser,
- eine doppelpolige Bleisicherung für die Batterie,
- ein Ausschalter, der den Strom unterbricht, wenn die Bremse angezogen wird,
- ein Ladekontakt zum Anschluß der Batterie an die Ladestation,
- ein automatischer Starkstromausschalter.

Die einzelnen Stufen des Fahrschalters für einen Motor (Abb. 119) sind folgende:

- 1 Rückwärts: Batterie parallel, mit Widerstand v. d. Motor, Ankerstrom reversiert.
- 2 Rückwärts: Batterie parallel, ohne Widerstand v. d. Motor, Ankerstrom reversiert.
- II Bremse: Batterie ausgeschaltet, Motor ohne Widerstand kurzgeschlossen.
- I Bremse: Batterie ausgeschaltet, Motor mit Widerstand kurzgeschlossen.
- 0 Halt: Batterie in Serie, Motor ausgeschaltet:
- 1 Vorwärts: Batterie parallel, mit Widerstand v. d. Motor.

2 Vorwärts: Batterie parallel, ohne Widerstand v. d. Motor.
3 Vorwärts: Batterie in Serie, mit Widerstand v. d. Motor.
4 Vorwärts: Batterie in Serie, ohne Widerstand v. d. Motor.
5 Vorwärts: Batterie in Serie, Widerstand parallel zu Magnetspule.

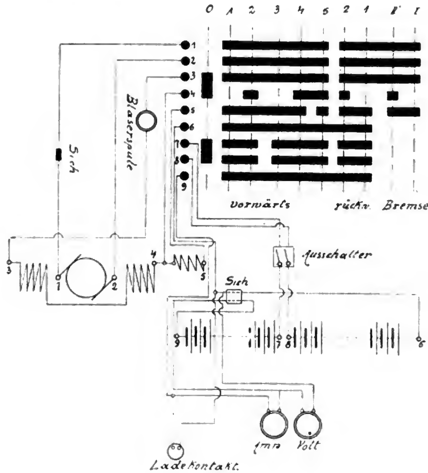


Abb. 119.

Zweckmäßig erfolgt der Antrieb eines Automobilwagens mit zwei Motoren, so daß zwei Wagenräder angetrieben werden. Zur Regulierung der Geschwindigkeit braucht hier die Batterie nicht unterteilt zu werden, vielmehr kann Serien-Parallelschaltung zur Anwendung kommen.

2. Die gleislosen Bahnen. Zwischen den elektrischen Schienenbahnen und den Akkumulatoren-Automobilen stehen die

sogen. gleislosen Bahnen. Dieselben sind an keinen Schienenstrang, dagegen an bestimmte Straßen gebunden. Die gleislosen Bahnen besitzen eine zweipolige oberirdische Stromleitung und sind mit Stromabnehmern versehen, die ein weites Ausfahren des Wagens aus der Achse der Oberleitungsdrähte zulassen. Infolgedessen steht dem Wagen die gesamte Straßenbreite zum Fahren zur Verfügung. Ein Ausweichen nach beiden Seiten oder ein Ueberholen anderer Fuhrwerke ist somit ohne Schwierigkeiten auszuführen.

Die Stromabnehmer können nach einer Ausführung der A. E.-G. in Form eines kleinen auf den Oberleitungsdrähten laufenden Wagens gebaut sein. Nach einem System von Schiemann können dieselben jedoch auch, ebenso wie bei Schienenbahnen, von unten an die Drähte angedrückt werden. Diese Konstruktion hat den Vorteil, daß das zur Verwendung kommende Oberleitungsmaterial sich nicht wesentlich von dem üblichen zu unterscheiden braucht und ein Entgleisen oder Herabfallen der Stromabnehmer ausgeschlossen ist. Nach dem System „Schiemann“ sind sowohl Personen- wie Güterbahnen zur Ausführung gekommen, und sei hier auf die betr. Literatur verwiesen.*)

IX. Abschnitt.

Kostenanschläge und Verträge.

1. Kostenanschlag für den Bau einer Strassenbahnlinie.

Tit. I. Grunderwerb.

Ankauf des N. N.schen Grundstückes. . . . . . m^2 groß, Grundbuch Nr. . . ., zur Errichtung der Bahnzentrale. Preis für 1 m^2 . . . . Mk.

(Auf guten, tragfähigen Baugrund ist Bedacht zu nehmen. Die Belastung des Baugrundes soll 2,5 kg/cm^2 nicht überschreiten. Neben einer für Kohlentransport usw. praktischen

*) *„Elektr. Bahnen“ 1903, Heft I.*

Lage der Baustelle müssen die Wasserverhältnisse günstig sein. Die Kosten für etwaige Straßenbauten, für den Umbau oder die Beseitigung vorhandener Baulichkeiten sind zu berücksichtigen.)

Tit. II. Baulichkeiten.

Zentrale, bestehend aus Dampfkesselhaus, Maschinenhaus, Schornstein, Verwaltungsgebäude, Wagenhalle, Reparaturwerkstätte, Akkumulatorenraum, Nebengebäuden.

1 m² Wagenhalle, 3,4—5 m hoch, massiv Ziegelmauerwerk, Eisenbinder und Eisensäulen . . . . 30—40 Mk.

(Bei kleineren Bahnanlagen wird die Wagenhalle zweckmäßig mit den übrigen Baulichkeiten, wie Zentrale und Verwaltungsgebäude, vereinigt. Bei Bahnen größerer Ausdehnung werden sich mehrere Hallen an verschiedenen Stellen erforderlich machen, um den Wagenpark unterbringen zu können. Die Wagenhallen werden sich dann meistens außerhalb der Stadt an den Enden größerer Bahnlinien befinden. Die Wagenremisen sind meistens mit einer Glühlichtbeleuchtung und einer ausgedehnten Ent- und Bewässerungsanlage versehen. Durch Abb. 120 ist das Schema eines solchen Be- und Entwässerungsplanes wiedergegeben. Im Innern der Halle oder außerhalb derselben befindet sich ein Brunnen, aus welchem eine durch einen Elektromotor angetriebene Pumpe Wasser ansaugt und in ein aus Eisenblech angefertigtes Bassin pumpt, welches in einer Höhe von mehreren Metern auf Konsolen oder in der Dachkonstruktion der Halle angebracht ist. Das in diesem Behälter aufgespeicherte Wasser soll dazu dienen, durch das Rohr *d* den Sprengwagen zu füllen und ferner in die Rohrleitung *h*, welche sich rings

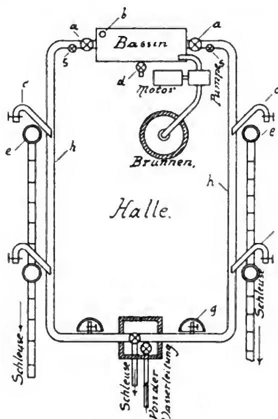


Abb. 120.

an der Mauer der Halle hinzieht, Wasser zu geben. Diese Verteilungsleitung *h* wird durch die beiden Hähne *a* mit dem Bassin in Verbindung gesetzt. Von *h* zweigen au mehreren Stellen der Halle nach oben Rohrleitungen *c* ab, welche etwa 1,5 m über Fußboden an der Mauer hochgeführt werden und als Abschluß einen Feuerhahn tragen, d. h. ein Mundstück, an welches leicht und schnell ein Feuerlöschschlauch angeschlossen werden kann. Die Wasserleitung *h* kann somit im Notfall zur Feuerlöschung gute Dienste leisten. Einen andern Zweck erfüllt die Leitung dadurch, daß sie zur Reinigung der Halle und der Wagen zu benutzen ist.

Die Feuerhähne *c* entwässern in ein Tonrohr, welches mit Einfall und Sieb versehen ist. Diese Rohre sind an die Straßenschleuse angeschlossen. *g* sind Ausgußbecken, welche Waschzwecken dienen können. An der Vorderseite der Halle befindet sich ein kleiner gemauerter Schacht, in welchem zwei Hähne eingebaut sind. Der linke Hahn entwässert die Verteilungsleitung in die Schleuse, wenn aus irgend einem Grunde eine Entleerung derselben sich nötig macht. Hierbei sind die beiden kleinen Hähne *s*, welche sich am entgegengesetzten Ende der Leitung befinden, zu öffnen, damit das Wasser aus der Rohrleitung ausfließen kann.

Der rechte Hahn im Schacht versieht geöffnet die Verteilungsleitung mit Wasser aus der städtischen Wasserleitung, so daß im Notfall durch dieses Rohr Wasser zugeführt werden kann.

Das im Bassin befindliche Rohr *b* ist ein Ueberlaufrohr, welches überschüssiges Wasser abführt.

Zwecks guter Beleuchtung ist die Wagenhalle am besten teilweise mit Oberlicht zu versehen.

Die Wagen können entweder direkt auf den Gleisen das Innere der Halle befahren oder aber auch mit Hülfe einer mechanisch oder elektrisch betriebenen Schiebebühne in die Halle rangiert werden. Für die Möglichkeit einer sofortigen Revision sind die Gleise im Innern der Remise mit Revisionsgruben zu versehen. Das Ende eines jeden Gleises soll zur Verhinderung des Anstoßens der Wagen an die Mauer mit einem einfachen Prellbock ausgestattet sein. Derselbe kann in folgender Weise ausgeführt werden (Abb. 121). Auf einer 20 bis 25 cm starken Eichenbohle ist ein Lokomotivpuffer in Höhe der Straßenbahnpuffer aufgeschraubt. Die Bohle selbst wird gehalten durch 4 ⊏-Eisen, welche gebogen und mittelst

Schraubenbolzen an den Schienen befestigt werden. Zur größeren Festigkeit sind die [-Eisen auf beiden Seiten noch durch ein aufgenietetes starkes Blech zusammengehalten.)

1 m^2 Kesselhaus, 4,0—5,0 m hoch, massiv, innen und außen verblendet, mit Eisenbindern	40—50 Mk.
1 m^2 Werkstattgebäude, 3,5—4,5 m hoch, eingeschossig, massiv, innen und außen verblendet	30—40 Mk.

(Das Werkstattgebäude soll eine Dreherei, Schlosserei, Schmiede und Ankerwickelei enthalten. Hierzu tritt bei größeren Anlagen noch eine Tischlerei, Lackirerei und Gießerei. Das Gebäude muß selbstverständlich Gleisanschluß besitzen und mit Revisionsgruben versehen sein.)

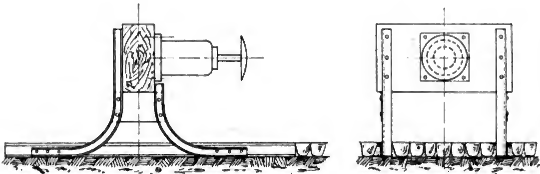


Abb. 121.

Schornstein pro m^3	30—40 Mk.
1 m^2 Verwaltungsgebäude	"

(Die Verwaltungsgebäude enthalten die Diensträume und eventuell die Wohnung des Direktors. Der Eingang in das Verwaltungsgebäude wird zweckmäßig von den Eingängen der Betriebsräume getrennt. Mit dem Verwaltungsgebäude häufig verbunden ist der Mannschaftsraum zum Aufenthalt der Leute für kurze Zeit.

In den Abb. 122 und 123 sind die Lagepläne zweier Bahnhöfe, die von der Zentrale örtlich getrennt sind, aufgezeichnet. Man erkennt die Halle, verbunden durch ein Gleis mit einem kleinen Montageraum für unbedeutendere Reparaturen. An den Montageraum schließt sich der Mannschaftsraum an. Ferner ist vorgesehen das Abortgebäude und ein Salzschuppen zur Aufnahme des Streusalzes, das im Winter in großen Mengen zur Verfügung stehen muß. Das Verwaltungsgebäude steht in der

Straßenflucht und besitzt einen eigenen Eingang, gleichzeitig enthält es eine Wohnung für den Depot-Inspektor. Vor der Wagenhalle befindet sich eine Schiebebühne, auf welche sämtliche oder wenigsten die meisten Gleise der Wagenhalle münden. Von der Straße aus braucht sodann nur ein Gleis auf die Bühne zu führen, um die Wagen durch Verschieben mit der Bühne auf ein beliebiges Gleis der Halle abzusetzen)

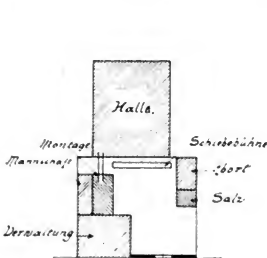


Abb. 122.

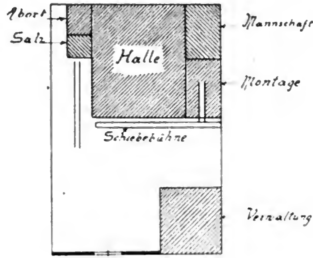


Abb. 123.

Es folgen sodann die Lieferungsbedingungen und Preise für

Dampfkessel Dampfmaschinen Dynamomaschinen Akkumulatoren	mit sämtlichen Nebenapparaten.

Tit. III. Erdarbeiten.

Unter diese Position fällt das Versetzen von Laternen, die Verlegung von Fußwegen, Schleusenschächten usw. Diese Arbeiten sind in einem Kostenanschlag möglichst zu berücksichtigen, da ihre Kosten unter Umständen erheblich sein können.

Tit. IV. Oberbau.

Ueber die Lage der Gleise im Straßenkörper ist bereits in dem Kapitel VI das Nötigste gesagt worden. Im Kostenanschlag einer zu bauenden Bahn wäre an dieser Stelle die Lage und Anordnung der Gleise zu präzisieren. Ferner ist an Hand des Lageplanes der Bahn anzugeben, an welchen Stellen

Weichen und Entwässerungen einzubauen sind. Im Kostenanschlag ist selbstverständlich auf letztere Rücksicht zu nehmen.

Der Preis für die Herstellung des gesamten Oberbaues, bestehend in den Ausschachtungs-, Planierungs- und Pflasterarbeiten gliedert sich meistens in mehrere Teile, die wie folgt angenommen werden können. (Vorausgesetzt wird die Verwendung des Straßenprofiles Abb. 63.):

Pos. 1. Chaussierung aufbrechen, das Chaussierungsmaterial zu gewinnen, auf die Seite auf Haufen zu transportieren und auf angegebene Lagerplätze abzuführen, à m^2 1,90.

Pos. 2. Planum in der erforderlichen Tiefe bis 40 cm herstellen, das überschüssige Material wieder abfahren, die Planie ebenen und abrammen .... 0,60 Mk.

Pos. 3. Neues Packlager bester Qualität ordnungsgemäß setzen, 20 cm hoch und verzwicken, die Packlageroberfläche mit beim Aufbruche gewonnenem und vorher durchzuwerfenden Klarschlagmaterial abgleichen, darauf mit Dampf- oder Pferdewalze abwalzen........ 1,50 Mk.

Pos. 4. .... lfd. m Stopfmaterial in erforderlicher Breite und 5 cm Höhe zum Unterstopfen der Schienen unter Benutzung des beim Aufbruche gewonnenen und durch Durchwerfen brauchbar gemachten Materials, aufbringen .... à lfd. m 0,15 Mk.

Pos. 5. .... lfd. m Schiene auf jeder Seite mit magerem Zementmörtel (ein Teil Zement, zehn Teile Sand) behufs guter Anlage der Pflastersteine an die Schienen ausfüllen à lfd. m 0,60 Mk.

Pos. 6. .... m^2 Straßenfläche mit bossierten Pflastersteinen II. Klasse, die an die Baustelle geliefert werden, zu pflastern, das Sandbett in erforderlicher Stärke unter Lieferung des Sandes den städtischen Vorschriften entsprechend einzubringen, die Steine nach dem vorherigen Sortieren in dieses Sandbett zu setzen, das Pflaster nach Erfordernis ein- oder mehreremal zu rammen, die Sanddecke zu liefern, aufzubringen und das Pflaster fix und fertig herzustellen à m^2 2,50 Mk.

Pos. 7. Einbau von Entwässerungsanlagen.... à ... 3,00 Mk.

Bei Anführung der Preise für die Schienenverlegung ist ein Materialnachweis für das zu verwendende Schienenmaterial aufzustellen. Die Ausweichen, Kreuzungen usw. sind hiervon getrennt aufzuführen, z. B.:

. . . lfd. m einfaches Gleis, Phönix Profil 14 $\frac{c}{\cdot}$ (1 lfd. m = 96,6 kg) mit Fußlaschen fix und fertig zu verlegen . . . . à lfd. m 1,10 Mk.

(Das Gleis ist unter Einhaltung einer Spur von 1 m und einer Mittelspur von 2,5 m in Sandpflasterstraße unter Lieferung sämtlicher Werkzeuge ordnungsgemäß zu verlegen. In den Preis einbegriffen ist das Biegen und Nachbiegen der Kurvenschienen, das Schneiden der Paßschienen einschl. Bohren aller Löcher, Anbringung der Schienenverbindungen, gutes Unterstopfen der Schienen mit Transport der Schienen und des Kleineisenzeuges.)

Für das Verlegen von Weichen etc. wird ein Zuschlag für erschwerte Arbeit gemacht.

Tit. V. Stromzuführung.

A. Speiseleitung.

. . . . m eisenbandarmiertes Kabel . . . . à m 8,00 Mk.

. . . . lfd. m Kabel fix und fertig ordnungsgemäß zu verlegen, d. h. Auswerfen des Grabens in einer Tiefe von 70 cm, Ebenen der Grabensohle, Einlegen des Kabels nach den Vorschriften der Bauverwaltung, Bedecken des Kabels mit Ziegelsteinen, Verfüllen des Grabens und ordnungsgemäße Wiederherstellung des Oberbaues 2,00 Mk.

(Die Größe des zur Verlegung gelangenden Kabelnetzes geht aus einem beigefügten Uebersichtsplan hervor. In den Straßen, in denen mehrere Kabel zur Verlegung gelangen, werden diese in ein und denselben Graben eingebettet. Die genaue Lage des Kabelgrabens wird an Ort und Stelle im Einvernehmen mit der zuständigen Baubehörde bestimmt, jedoch herrscht als Prinzip vor, daß die Kabel im Fußwege dicht neben den Bordstein zu liegen kommen. Die Kabel dürfen hoch liegende Gas- und Wasserröhren nicht überschreiten, so daß an allen diesen Stellen sich ein Durchziehen des Kabels erforderlich macht. Zum Transport der Kabel ist ein geeigneter Kabelwagen zur Verfügung zu stellen.)

Die Preise für die Kabelverlegung sind verschieden und richten sich nach der Tiefe des Kabelgrabens und der Straßen- bzw. Fußwegbefestigung.

Anzuführen sind unter Tit. IV und V Tagelohnarbeiten, da nicht alle vorkommenden Arbeiten nach Einheitslöhnen bezahlt werden können. z. B.:

1 Vorarbeiter	mit	Werkzeug	zu	stellen	pro	Stunde	....	Mk.,
1 Steinsetzer	„	„	„	„	„	„	....	„
1 Steinmetz	„	„	„	„	„	„	....	„
1 Handarbeiter	„	„	„	„	„	„	....	„
1 Maurerpolier	„	„	„	„	„	„	....	„
1 Maurer	„	„	„	„	„	„	....	„

Nachtarbeit (zwischen 7 Uhr Abends und 5 Uhr früh), sowie bei Sonntagsarbeit, ist zu allen Preisen .... % Zuschlag zu gewähren.

B. Tragmasten und Rosetten.

Zunächst ist ein Materialnachweis aufzustellen, z. B.:

.... Stück Gittermasten der Type A .... à 115 Mk.,
.... „ „ „ „ B .... à 195 „
.... „ Rosetten mit Steinschrauben .... à 5 „

Hieran schließen sich die Preise für das Setzen der Masten bzw. für das Einmauern der Steinschrauben:

... Stück Masten der verschiedenen Type setzen à 25 Mk.,
.... „ Steinschrauben einmauern .... à 4 „

Dazu kommen noch die Preise für Anstricharbeiten für Masten und Rosetten.

C. Arbeitsleitung mit Zubehör.

Zunächst ist ein Materialnachweis aufzustellen, der die Art und Stückzahl der verschiedenen Isolatoren für gerade Strecken und Kurven, die Spannschrauben, Weichen, Kreuzungen, Streckenausschalter, Isolierrollen, Schienenverbindungen usw. enthält. Die Stärke des Fahrdrahtes und die Art seiner Verlegung ist anzugeben. Der Preis für die Oberleitung eines Meters einfachen Gleises mit Montage kann zu etwa 12 Mk. angenommen werden.

Tit. VI. Telephonschutz.

Es sind genauere Angaben über die Vorsichtsmaßregeln zu machen, die bezwecken, die den Fahrdrähten benachbarten oder sie kreuzende Schwachstromleitungen vor Berührung oder induzierenden Einwirkungen zu schützen. Soweit es möglich ist, sind die Kosten für diese Arbeiten anzuführen.

Tit. VII. Vorarbeiten und Bauleitung.

Es sind die Kosten für Tit. VII anzuführen.

Tit. VIII. Probebetriebe.

Tit. IX. Uniformierung und Inventar.

2. Besondere Bedingungen für die Ausführung von Erd- und Pflasterarbeiten bei Verlegung von Strassenbahngleisen.

§ 1.

Es sind die Linien aufzuführen, welche bei den Arbeiten in Frage kommen. Aus Lageplänen muß der Unternehmer die Ausdehnung der Arbeiten entnehmen können. Anzuführen ist, daß diese Arbeiten jedoch ganz nach dem Ermessen der betr. Verwaltungen beliebig vermehrt oder vermindert werden können.

§ 2.

Für die Ausführung der Arbeiten sind die Lagepläne und etwaige ebenfalls beigegebene besondere Straßenprofile und Bedingungen und Vorschriften städtischer oder ländlicher Baubehörden maßgebend. Außerdem sind alle schriftlichen und mündlichen Anordnungen der Bauverwaltungen unbedingt bindend für den Unternehmer. Ebenso hat sich der Unternehmer alle Abweichungen in den Lageplänen gefallen zu lassen. Ferner steht auch dem Unternehmer irgend eine Mehrforderung nicht zu, falls aus irgend welchen Gründen an gewissen Stellen die Arbeit unterbrochen werden muß.

§ 3.

Die Lieferung und Anfuhr der Baumaterialien hat seitens des Unternehmers zu erfolgen. Die Materialien haben den behördlichen Bedingungen zu genügen. Es wird verlangt:

1. für Zement eine bestimmt anzugebende Sorte,
2. „ Sand „ „ „ „
3. „ Klarschlag „ „ „ „
4. „ Kalk „ „ „ „

Proben dieser Materialien sind einzureichen (event. können bestimmte Materialien, wie Klarschlag, Pflastersteine u. a. von der Bauverwaltung selbst oder von den städtischen bzw. ländlichen Behörden angeschafft und dem Unternehmer zur Verfügung gestellt werden. In diesem Falle wird meistens der Transport dieser Materialien von den Lagerplätzen nach der Baustelle dem Unternehmer zufallen). Das Abladen der Materialien hat ebenfalls vom Unternehmer zu geschehen und ist sorgfältig auszuführen. Für eine rechtzeitige Anfuhr der Materialien ist allein der Unternehmer haftbar zu machen. Das aus der Straße gerissene Material hat der Unternehmer auf

Lagerplätze, die er sich selbst zu beschaffen hat, abzufahren und bis zur Wiederverwendung aufzuschichten. Der Rücktransport zur Baustelle hat ebenfalls durch ihn zu erfolgen. Das gewonnene Altmaterial fällt nicht dem Unternehmer zu, sondern ist an bestimmte zu bezeichnende Abladeplätze abzufahren.

§ 4.

Das Abstecken der Gleise erfolgt nach den Angaben der Bauverwaltung. Ein beigegebenes Straßenquerprofil ist für die Breite des erforderlichen Straßenaufbruches maßgebend.

§ 5.

Bei den Wiederherstellungsarbeiten für den Oberbau, d. h. z. B. bei den Pflasterarbeiten ist darauf zu achten, daß die Schienenverbindungen nicht beschädigt werden. Das Einpflastern der Gleise darf erst erfolgen, nachdem dieselben abgenommen worden sind.

§ 6.

Sämtliche Gerätschaften hat der Unternehmer zu liefern und instand zu halten.

§ 7.

Der Unternehmer hat die Arbeiten selbst auszuführen und keinem Subunternehmer zu übertragen. Die ihm übertragenen Arbeiten sind derartig zu fördern, daß jedenfalls täglich 14 Tage nach Baubeginn z. B. 50 lfd. m einfaches Gleis resp. 25 lfd. m doppeltes Gleis in Zementnpflasterung und das Doppelte in Sandpflasterung an jeder Baustelle fertig gestellt werden. Eintretende Unterbrechungen dürfen nicht vom Unternehmer verschuldet sein, wenn dieselben das Nichterreichen der Mindestleistung entschuldigen sollen.

Die Bauverwaltung behält sich das Recht vor, dem Unternehmer die Arbeiten zu entziehen und auf seine Kosten von anderen ausführen zu lassen, wenn die Arbeiten allzu langsam gefördert werden.

Der Unternehmer hat innerhalb zweier Tage nach erfolgter Aufforderung hin mit dem Bau zu beginnen.

§ 8.

Der Unternehmer hat, sobald dies seitens der Bauverwaltung verlangt wird, mit dem Bau einer Strecke an mehreren Stellen gleichzeitig zu beginnen.

§ 9.

Alle behördlichen Meldungen, die zum Beginn und zur regelmäßigen Fortsetzung des Baues erforderlich sind, hat der Unternehmer zu übernehmen.

Für die polizeilicherseits vorgeschriebene Aufstellung von Barrieren sowie für die Beleuchtung der Arbeitsstellen hat der Unternehmer zu sorgen.

§ 10.

Der Unternehmer hat nach Höhe einer bestimmten Summe der Vertragssumme Sicherheit zu leisten und dieselbe binnen drei Tage nach Zuschlagserteilung der Bauverwaltung zur Verfügung zu stellen.

Mit dieser Summe haftet der Unternehmer für den rechtzeitigen Beginn des Baues, gleichzeitig dient sie zur Sicherung für die ordnungsgemäße Erfüllung der obliegenden Verbindlichkeiten.

§ 11.

Die endgültige Abnahme der Arbeiten und Lieferungen und ihre Abrechnung erfolgt nach gänzlicher Vollendung derselben und nach erfolgter Abnahme der gebauten Strecke durch die Behörde.

Nach erfolgter Aufforderung hat der Unternehmer seine Kostenrechnung innerhalb 14 Tage einzureichen.

Vor Abrechnung der vollendeten Strecke können dem Unternehmer Abschlagszahlungen gewährt werden. Diese Abschlagszahlungen enthalten keine Genehmigung oder Abnahme der bereits fertig gestellten Arbeiten, sondern es haftet der Unternehmer auch nach der Zahlung noch für die Güte der Arbeiten und Materialien.

§ 12.

Der Unternehmer leistet vom Tage der Abnahme der gebauten Strecke durch die Behörde an für gute Ausführung und gutes Material auf zwei Jahre Garantie, wonach er verpflichtet ist, alle infolge fehlerhafter Ausführung oder fehlerhaften Materials entstehenden Schäden auf seine Kosten auszubessern.

Zur Sicherstellung dieser Verbindlichkeiten werden .... % des Guthabens als Kaution zwei Jahre lang innebehalten.

§ 13.

Der Unternehmer oder ein mit den nötigen Vollmachten versehener Vertreter desselben wird während der Dauer des

Baues seinen Wohnort im Orte selbst nehmen, so daß eine jederzeitige mündliche Verständigung mit ihm möglich ist.

3. Kostenanschlag über die Gleisverlegungsarbeiten einer Strassenbahn.

1. Ca. .... lfd. m Einfachgleis Phönix Profil 14 $\frac{c}{\cdot}$ bei einer Gleisspur von 1000 mm und einer Mittelspur von 2,5 m in Pflasterstraße ordnungsgemäß zu verlegen, und zwar Vorstrecken der Schienen und kunstgerechtes Ausrichten derselben nach Plan- und Höhenlage, einschließlich Biegen und Nachbiegen der Kurvenschienen, Zuschneiden der Paßschienen einschl. Bohren der Laschenlöcher, Anbringen der Schienenverbindungen, Herstellen der hierzu erforderlichen Löcher am Schienensteg, gutes Unterstopfen der Schienen, nachdem die Unterbettung von anderer Seite hergestellt ist.

Die Leistung bezieht sich auf das Einlegen und gute Unterstopfen der Gleise etc. einschl. der Transporte der Schienen und des Kleineisenzeuges von der jeweiligen Lagerstelle in der Nähe des Baues zur Baustelle selbst ohne jede Arbeit am Straßenkörper.

Preis pro lfdm. Gleis .... Mk.

2. Für das Verlegen von Weichen wird als Zuschlag wegen erschwerter Arbeit gezahlt:

a) eine einfache Weiche zu verlegen ....
b) eine halbe Umfahrung, d. h. eine Verbindung auf offener Strecke zwischen zwei Gleisen zu verlegen ....
c) eine Kreuzung mit der Staatseisenbahn für ein zu benutzendes von Zügen befahrenes Gleis einschl. Auswechseln der Eisenbahnschienen...................
d) eine Rechts- oder Linkskreuzung einbauen ....

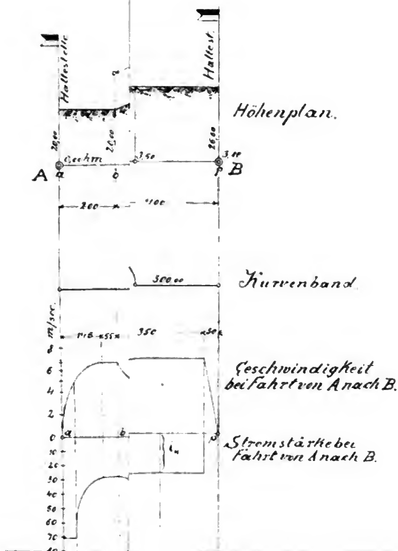
Tagelohnarbeiten.

a) einen Schachtmeister oder Vorarbeiter zu stellen einschl. Meistergebühren, pro Stunde.....................
b) einen Arbeiter mit Werkzeug wie vor pro Stunde ....

Sämtliche Gerätschaften und Werkzeuge, die zu vorstehenden Arbeiten benötigt werden, sowie die Meistergelder, sind in obigen Preisen mit enthalten. Bei Nachtarbeit (zwischen 7 Uhr abends und 5 Uhr früh), sowie bei Sonntagsarbeit, wird zu allen vorstehenden Preisen ... % Zuschlag gewährt.

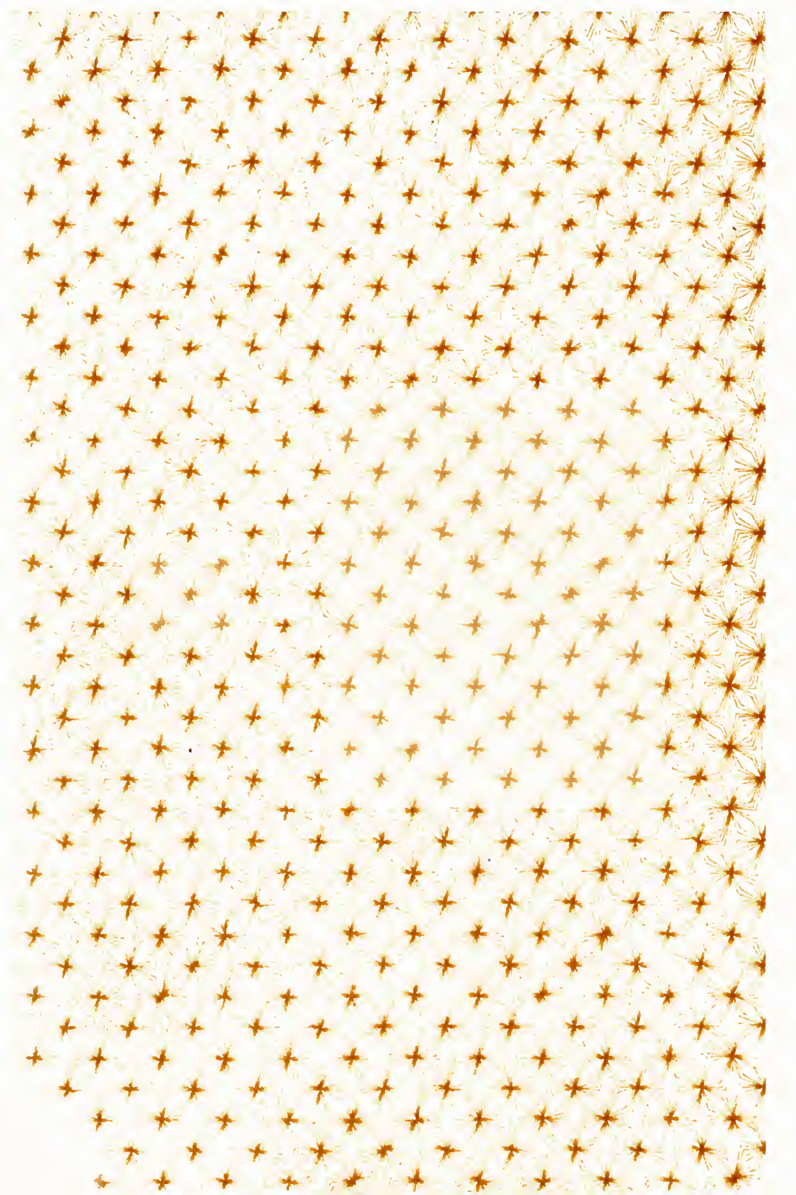
Namen- und Sachregister.

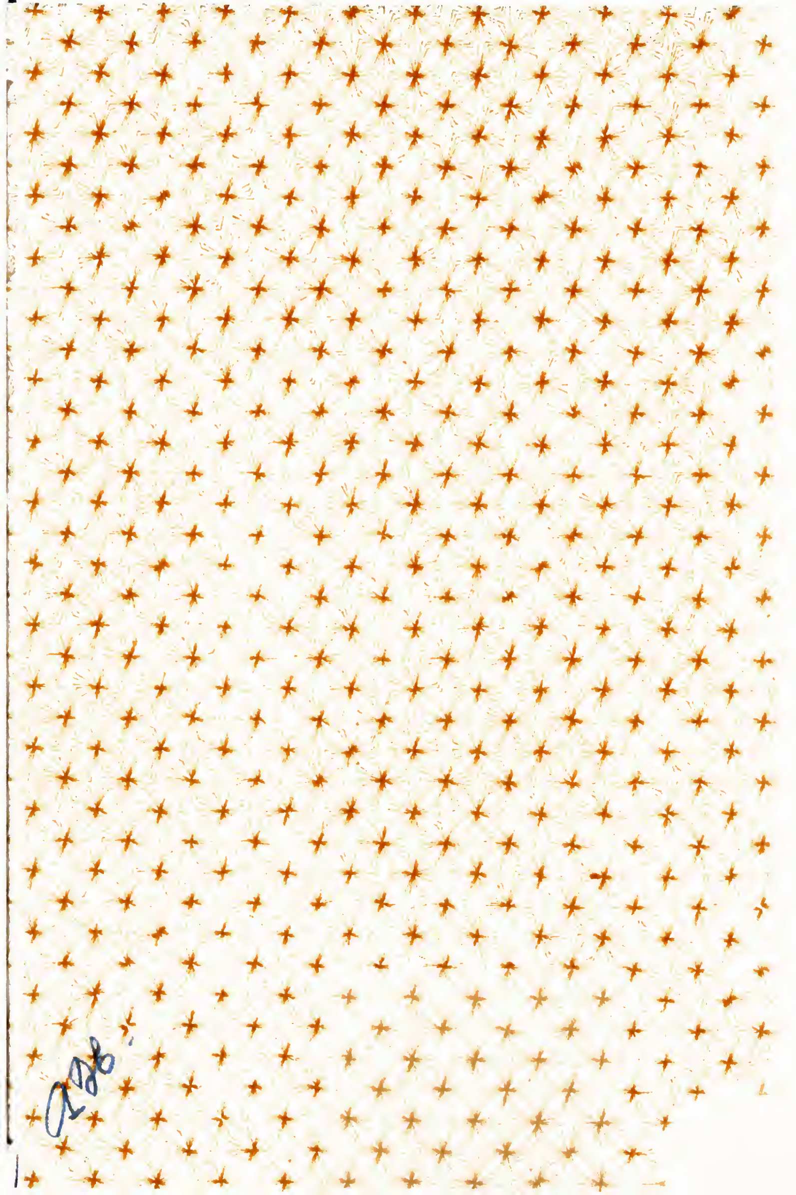
Tafel I.

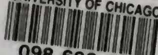


Höhenplan.
Haltestelle
Haltest.
A
B
Kurvenband
300,00
Geschwindigkeit bei Fahrt von A nach B.
Stromstärke bei Fahrt von A nach B.
m/sec.

Druck von F. E. Haag, Melle i. Hann.






UNIVERSITY OF CHICAGO
098 690 483